

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Institut dopravy

# Diplomová práce

2018

Bc. Václav Šelong

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Institut dopravy

# **Komplexní výpočtový model spalovacího motoru**

Computational Model of Internal Combustion  
Engine

Student:  
Vedoucí diplomové práce:

Bc. Václav Šelong  
Ing. Pavel Dresler

Ostrava 2018

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Václav Šelong**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2301T003 Dopravní technika a technologie  
Specializace: 20 Silniční doprava  
Téma: **Komplexní výpočtový model spalovacího motoru**  
**Computational Model of Internal Combustion Engine**  
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Cíl: Cílem práce je navrhnout komplexní výpočtový model vybraného spalovacího motoru

1. Úvod.
2. Teoretický rozbor řešené problematiky.
3. Specifikace zvoleného motoru.
4. Návrh metodiky tvorby modelu.
5. Tvorba a validace výpočetního modelu.
6. Zhodnocení a doporučení.
7. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

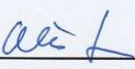
1. MACEK, Jan. Spalovací motory. 2. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2012. ISBN 978-80-01-05015-6.
2. JOHN B. HEYWOOD., Jan. Internal combustion engine fundamentals. International ed. New York: McGraw-Hill, 1988. ISBN 00-702-8637-X.
3. EDITED BY RICHARD VAN BASSHUYSEN AND FRED SCHÄFER., Jan. Internal combustion engine handbook basics, components, systems, and perspectives. International ed. Warrendale, Pa. (400 Commonwealth Dr., Wallendale PA USA): Society of Automotive Engineers, 2004. ISBN 978-076-8071-962.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Pavel Dresler**

Datum zadání: 08.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018

  
doc. Ing. Aleš Slíva, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

## **Místopřísežné prohlášení**

Tímto prohlášením se zavazuji, že jsem ve své diplomové práci nepoužil výsledků práce nikoho jiného a neporušil ničí duševní vlastnictví bez řádného uvedení zdrojů použité literatury a jejich citování. Při tvorbě práce jsem se snažil vytvořit vlastní a originální projekt.

V Ostravě dne 21.5.2018

Podpis:  .....



Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou diplomovou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této diplomové práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že - podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna

Bc. Václav Šelong

Václavovická 252,

Václavovice 739 34

V Ostravě dne 21.5.2018

Podpis:.....



## **ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE**

ŠELONG, V. Komplexní výpočtový model spalovacího motoru: diplomová práce. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, Fakulta strojní, Institut dopravy, 2018, 80 s. Vedoucí práce: Dresler, P.

Obsahem práce je popis postupu tvorby výpočtového modelu spalovacího motoru a jeho realizace. S tím souvisí charakteristika a popis samotného spalovacího motoru, který je pro tvorbu modelu použit. V práci je popsáno pracovní prostředí programu GT-SUITE, ve kterém je model sestaven. Tento postup se zabývá nastavením jednotlivých dílů a jejich sestavení do konečné podoby. V závěru diplomové práce se nachází popis validace včetně kroků, jež vedou ke zvýšení přesnosti simulace. Simulace je použitelná jako výukový materiál nebo jako vývojový prostředek pro úpravy motoru.

Klíčová slova: Motor, Model, Simulace

## **ANNOTATION OF MASTER THESIS**

ŠELONG, V. Computational Model of Internal Combustion Engine: Master thesis. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, The Institute of Transport, 2018, 80 p. Thesis head: Dresler, P.

The content of the thesis is a description of the process of creating the calculation model of the combustion engine and its implementation. This is related to the characteristics and description of the internal combustion engine itself, which is used to model the model. The work describes the GT-SUITE working environment in which the model is built. This procedure deals with setting the individual parts and assembling them to the final form. In the end of the thesis there is a description of the validation including the steps leading to an increase of the accuracy simulation. The simulation is useful as a training material or as a development tool for engine modification.

Key words: Engine, Model, Simulation

# Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk .....	9
1 Úvod.....	11
2 Teoretický rozbor řešené problematiky .....	12
2.1 Spalovací motor .....	12
2.1.1 Princip činnosti .....	12
2.1.2 Rozdělení spalovacích motorů .....	14
2.1.3 Termodynamické děje ve spalovacích motorech .....	14
2.1.4 Parametry SM .....	15
2.1.5 Charakteristiky spalovacích motorů .....	18
2.1.6 Pružnost motoru.....	20
2.2 Úvod do matematického modelování .....	22
2.2.1 Rozdělení modelů .....	23
2.2.2 Vibeho funkce .....	26
2.2.3 Přestup tepla .....	27
2.2.4 Vnitřní aerodynamika .....	30
3 Popis konkrétního spalovacího motoru.....	31
3.1 Pravidla soutěže FSAE týkající se spalovacího motoru .....	32
3.1.1 Plyn a ovládání plynu .....	33
3.1.2 Restriktor .....	33
3.1.3 Výfukový systém.....	34
3.2 Úpravy konkrétního SM .....	35
3.2.1 Dle pravidel .....	35

3.2.2	Další úpravy.....	37
4	Návrh metodiky tvorby modelu .....	38
5	Tvorba a validace výpočetního modelu .....	42
5.1	Základní struktura modelu .....	42
5.2	Získávání geometrických parametrů.....	43
5.3	Vložení geometrie do modelu.....	43
5.3.1	Sací systém .....	44
5.3.2	Spalovací motor.....	49
5.3.3	Výfukový systém.....	52
5.4	Nastavení okrajových podmínek .....	56
5.5	Spuštění simulace .....	58
5.6	Výsledky simulace .....	59
5.7	Validace a kalibrace modelu.....	60
5.7.1	Měření průtokových koeficientů .....	62
5.7.2	Výsledky s průtokovými koeficienty.....	67
5.7.3	Kalibrace modelu.....	68
6	Zhodnocení a doporučení .....	73
7	Závěr .....	74
	Použitá literatura .....	76
	Seznam příloh.....	77



## Seznam použitých symbolů a zkratk

$A$	Průtočný průřez	$[m^2]$
$A_S$	Velikost přestupné plochy	$[m^2]$
$C_f$	Třecí faktor	$[-]$
$C_p$	Charakteristické teplo	$[J]$
$D$	Ekvivalentní průměr	$[m]$
$H$	Entalpie	$[J]$
$K_p$	Koeficient tlakové ztráty	$[-]$
$Pr$	Prandlotovo číslo	$[-]$
$Q_{skut}$	Skutečný objemový průtok	$[m^3.s^{-1}]$
$Q_{teor}$	Teoretický objemový průtok	$[m^3.s^{-1}]$
$S_{ef}$	Efektivní plocha	$[m^2]$
$S_{přípravek}$	Plocha přípravku	$[m^2]$
$S_{ref}$	Referenční plocha	$[m^2]$
$S_v$	Plocha ventilu	$[m^2]$
$T$	Teplota	$[K]$
$T_{stěna}$	Teplota stěny	$[K]$
$T_{tekutina}$	Teplota tekutiny	$[K]$
$U_{eff}$	Vnější hranice efektivní rychlosti	$[m.s^{-1}]$

a	Podíl nespáleného paliva	[-]
$c_d$	Průtokový koeficient	[-]
d	Průměr ventilu	[m]
e	Pecifická vnitřní energie	[J]
h	Součinitel přestupu tepla	[-]
i	Exponent	[-]
$\dot{m}$	Hmotnostní průtok	[kg.s <sup>-1</sup> ]
$m_n$	Hmotnost náplně	[kg]
t	Čas	[s]
u	Rychlost	[m.s <sup>-1</sup> ]
x	Délka potrubí	[m]
$x_h$	Průběh hoření v ose x	[-]
$x_y$	Fáze hoření v ose y	[-]
$\alpha$	Úhel natočení klikové hřídele	[°]
$\varphi$	Celkový úhel hoření	[°]
$\varphi_B$	Úhel od počátku hoření	[°]
$\rho$	Hustota	[kg.m <sup>-3</sup> ]
FMEP	Friction mean effective pressure	[bar]
FSAE	Formula Society of Automotive Engineers	-
SM	Spalovací motor	-

# 1 Úvod

Tématem této diplomové práce je vytvoření virtuálního funkčního modelu reálného motoru, který bude svými vlastnostmi reprezentovat co nejreálněji svou předlohu. Jelikož se bude jednat o zážehový atmosférický motor, bude práce zaměřena především na problematiku zážehového motoru. Najdou se zde však také prvky, které jsou uplatitelné v obecné rovině matematického modelování.

Proč jít cestou vytvoření modelu? Konstrukce reálných dílů a následně jejich testování na skutečném motoru pomocí testovací stolice je velmi nákladné a samotný vývoj to může zpomalovat. Je tak vhodné vytvořit model, který se přiblíží skutečnému motoru a v tomto modelu poté provádět dílčí úpravy, které lze rychle vyhodnocovat. Vytvoření modelu je sice poměrně časově náročné, jelikož je nutno zajistit mnoho dat, avšak poté se investovaný čas rychle vrátí. Samotný proces získávání dat a sestavování modelu je dále popsán v práci.

Pro vytvoření samotného modelu musím nejprve navrhnout metodiku, jakou bude tvorba probíhat tak, aby byl sestavován systematicky a daný postup se dal přehledně opakovat, případně upravovat. Daný postup musí obsahovat veškeré kroky od začátku až do konce validace modelu tak, aby tento systém fungoval, a abych dosáhl požadovaných výsledků.

Aplikací navrženého postupu vytvořím výpočetní model, kterým budu simulovat provozní parametry spalovacího motoru s dostatečnou mírou přesnosti a jeho praktickým využitím.

Jsem členem týmu Formula TU Ostrava v rámci projektu Formula student. Poznatky z této práce tedy využiji při vývoji nových částí spalovacího motoru a může z ní těžit tým v následujících letech. Kromě toho se při účastech na závodech hodnotí vývoj jednotlivých částí vozu a porozumění problematice daného tématu. Mohu tedy připravit podklady vycházející z mé práce pro prezentaci před odbornou porotou a doložit dostatečné znalosti.

## **2 Teoretický rozbor řešené problematiky**

V této části se budu zabývat pojmy, jako je spalovací motor a jeho charakteristiky, modelování spalovacích motorů a popis jednotlivých modelů. Výsledkem by mělo být zpracování teoretického vstupu práce pro konečnou tvorbu matematického modelu v praktické části.

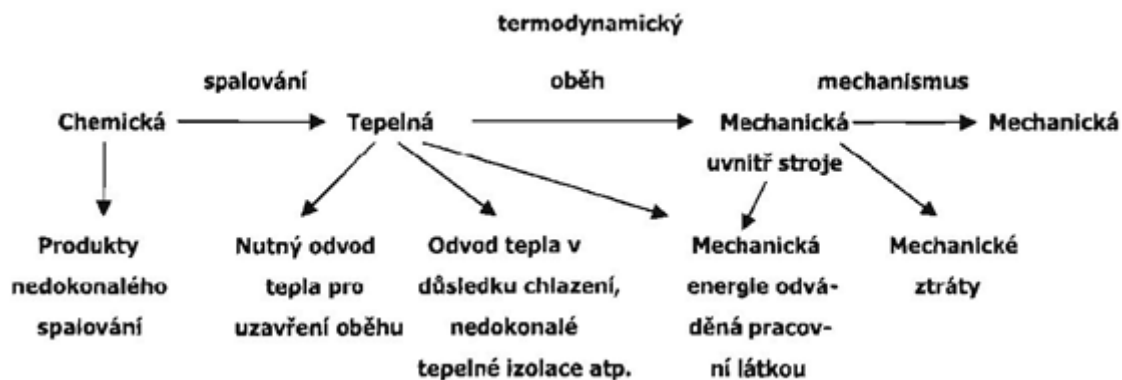
### **2.1 Spalovací motor**

„Jedná se o tepelný motor, jenž má vlastní zdroj tepelné energie. Ta je uvolněná z chemické energie obsažené v palivu během spalování. Zdroje tepelné energie mohou být i jiné, avšak v rámci této práce se budu zabývat tímto procesem.“ [6]

„Zdrojem tepelné energie je uvolňování chemické energie ze složek paliva chemickou přeměnou. K uskutečnění tohoto procesu je zapotřebí (kromě vlastního paliva) také další látka, která tvoří s prvky v palivu stabilní sloučeniny. Nejčastěji se jedná o kyslík obsažen v oxidizačidle, převážně v atmosférickém vzduchu.“ [6]

#### **2.1.1 Princip činnosti**

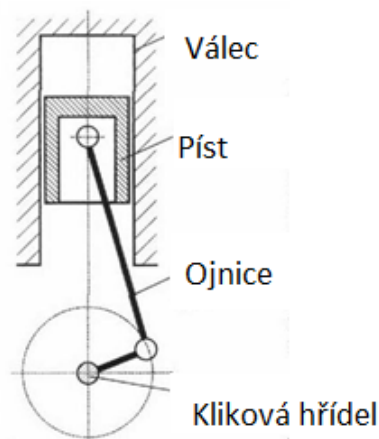
„Dle způsobu spalování se motory dělí na zážehové a vznětové. U zážehových motorů musí být teplota směsi vzduchu a paliva nižší, než je teplota samovznícení a zážeh směsi je spuštěn jiskrou. Jako palivo je zde využíván benzín nebo plyn (CNG, LPG), ale také například ethalon. U vznětových motorů dojde k samovznícení směsi paliva a vzduchu vlivem stlačení, jelikož teplota této směsi po stlačení překračuje teplotu potřebnou ke vznícení. Palivem je v tomto případě nafta.“ [6]



Obr. č. 2.1 Schéma přeměny a ztrát energie [6]

„Během transformace energií vznikají vlivem chemických procesů, termodynamických zákonů a konstrukčních nedokonalostí vedlejší ztráty (obr. č. 2.1), které snižují účinnost celého procesu. Tím je potlačen značný energetický potenciál v palivě.“ [6]

„Principem spalovacího motoru je získání mechanické energie (pohyb pístu) z energie chemické (obsažené v palivě), kterou lze pak užitečně využít například jako zdroj pro pohyb automobilu. Pro tento účel je využíván klikový mechanismus (obr. č. 2.2).“ [6]



Obr. č. 2.2 Klikový mechanismus [3]

## 2.1.2 Rozdělení spalovacích motorů

Pokud se zaměříme na základní kinematiku pohybu pístu, lze z tohoto pohledu rozdělit spalovací motory na motory, které využívají přímočarého vratného pohybu pístu a motory s rotačním pohybem pístu (Wankelův motor). Motory využívané v automobilech a motocyklech pracují s otevřeným pracovním cyklem, jehož chod se opakuje v určité periodě. Veškeré tyto děje se odehrávají ve válci spalovacího motoru, kde se taktéž nachází spalovací prostor.

Dále pro přehled uvedu pouze základní skupiny dalšího dělení spalovacích motorů:

1. Dle principu činnosti (čtyřdobé, dvoudobé)
2. Dle druhu paliva (kapalná, plynná,...)
3. Dle zapálení směsi (zážehové, vznětové)
4. Dle způsobu vytvoření směsi (před pracovním prostorem, ve válci motoru)
5. Dle plnění válce (atmosféricky plněné motory, přeplňované motory)
6. Dle účelu a použití (stacionární, dopravní,...)
7. Dle konstrukce

## 2.1.3 Termodynamické děje ve spalovacích motorech

Abych byl schopen stanovit základní parametry spalovacího motoru, jako je výkon, točivý moment a podobně, je nutné dobře porozumět samotnému procesu, ve kterém spalovací motor funguje a z něj nadále vycházet. K tomuto účelu mi dobře poslouží P-V a T-S diagram. Proces fungování spalovacího motoru lze vyjádřit jako ideální či skutečné oběhy. V případě ideálního oběhu zanedbáváme vnitřní ztráty energie pracovní látky. Samotné charakteristiky lze rozdělit na indikované a efektivní (užitečné).

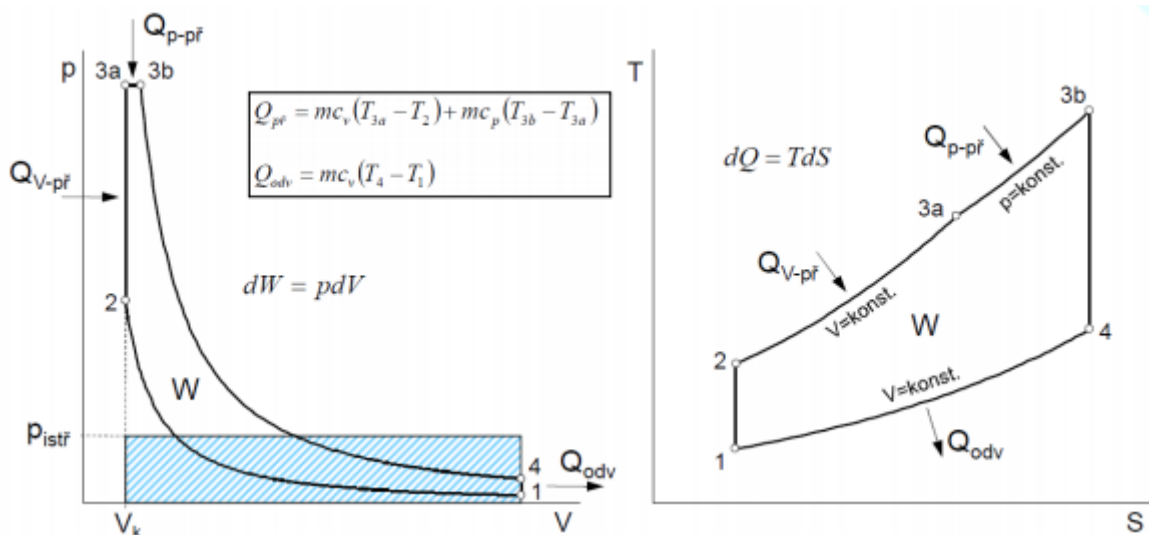
Tento diagram je složen z jednotlivých termodynamických vratných jevů. Stav pracovní látky v jednotlivých momentech určují stavové veličiny, jako je tlak, teplota a objem. Na základě toho mohu aplikovat stavovou rovnici.

Jak lze vidět na obr. č. 2.3, je P-V diagram sestaven z objemových a tepelných změn pracovní látky, které jsou způsobeny hořením směsi. U skutečného pracovního oběhu dochází ke změnám rychle a vzájemně se překrývají.



Abychom mohli oběh považovat za ideální, musí být splněny tyto požadavky:

- Pracovní látkou je ideální dvouatomový plyn s konstantní měrnou tepelnou kapacitou ( $c_p c_v$ )
- Změny stavu pracovní látky se považují za vratné
- V pracovním prostoru se nevyskytují netěsnosti a je dokonale tepelně izolován
- Změny objemu se nachází pouze v horní a dolní úvrati pístu
- K přívodu tepla dochází při stálém objemu v horní úvrati nebo při stálém tlaku od horní úvratě, případně kombinací předchozího
- Teplo je odváděno v momentě, když skončí expanze pracovní látky v pracovním prostoru (píst v dolní úvrati).



Obr. č. 2.3 Pracovní cyklus SM [7]

## 2.1.4 Parametry SM

### Indikované parametry (má BP)

Indikované charakteristiky jsou charakteristiky, které určuje indikátorový diagram (obr. č. 2.3). Pomocí těchto charakteristik můžeme vzájemně porovnávat konstrukci motorů.

Indikovaná práce:

Indikovaná práce je stanovena obsahem plochy uvnitř indikátorového diagramu.

$$W_i = \oint p_i dV \quad (2.1)$$

$W_i$ ...indikovaná práce [J]

$p_i$ ...indikovaný tlak [Pa]

$dV$ ...elementární objem [ $m^3$ ]

Pomocí integrace vypočítám velikost plochy, která se rovná práci oběhu. Tato práce se skládá z jednotlivých elementárních objemů  $dV$ , kterým připadá konkrétní hodnota tlaku  $p_i$ .

Střední indikovaný tlak:

„Vyjadřuje míru využití jednotky zdvihového objemu k získání práce. Tento údaj reprezentuje míru využití paliva k získání práce. Jedná se o smyšlenou veličinu, která slouží k vzájemnému porovnávání jednotlivých motorů.“ [6]

$$p_{i,stř} = \frac{W_i}{V_z} \quad (2.2)$$

$p_{i,stř}$ ...střední indikovaný tlak [Pa]

$V_z$ ...zdvihový objem [ $m^3$ ]

Indikovaný výkon jednoho válce:

$$P_{i,1} = W_i \cdot \frac{n}{k \cdot 60} \quad (2.3)$$

$P_{i,1}$ ...indikovaný výkon jednoho válce [W]

$n$ ...otáčky spal. motoru [ $\text{min}^{-1}$ ]

$k$ ...taktnost (1 pro dvoutaktní motory, 2 pro čtyřtaktní motory) [-]

### **Efektivní (užitečné) parametry**

„Efektivní charakteristiky, na rozdíl od indikovaných, zahrnují mechanické ztráty, které v motoru vznikají při přenosu sil na klikovou hřídel.“ [6]

Efektivní výkon:

$$P_e = M_T \cdot \omega = M_T \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \quad (2.4)$$

$P_e$ ...efektivní výkon [W]

$M_T$ ...točivý moment motoru [N.m]

Střední efektivní tlak:

$$p_{e,stř} = \frac{P_e \cdot k \cdot 60}{i_v \cdot V_{Z1} \cdot n} \quad (2.5)$$

$p_{e,stř}$ ...střední efektivní tlak [Pa]

$V_{Z1}$ ...zdvihový objem jednoho válce [ $\text{m}^3$ ]

$i_v$ ...počet válců [-]

Plnicí účinnost:

„Pomocí této účinnosti vyjádříme využití zdvihového objemu válce naplněným vzduchem.“ [6]

$$\eta_{pl} = \frac{m_n}{V_{Z1} \cdot \rho} \quad (2.6)$$

$\eta_{pl}$ ...plnící účinnost [-]

$m_n$ ...hmotnost náplně [kg]

$\rho$ ...hustota náplně [kg/m<sup>3</sup>]

Volumetrická neboli objemová účinnost:

Tato veličina určuje využití objemu válce, který je k dispozici pracovní náplní, již je válec naplněn. [2]

$$\eta_v = \frac{V_N}{V_{Z1}} \quad (2.7)$$

$\eta_v$ ...objemová účinnost [-]

$V_N$ ...objem nasátého vzduchu ve válci [m<sup>3</sup>]

### 2.1.5 Charakteristiky spalovacích motorů

Tyto typy charakteristik slouží k vyhodnocování daných provozních veličin, jako je například výkon, točivý moment, atd., na dalších proměnných, jako jsou otáčky motoru, zatížení motoru, atd.

Základní rozdělení těchto charakteristik:

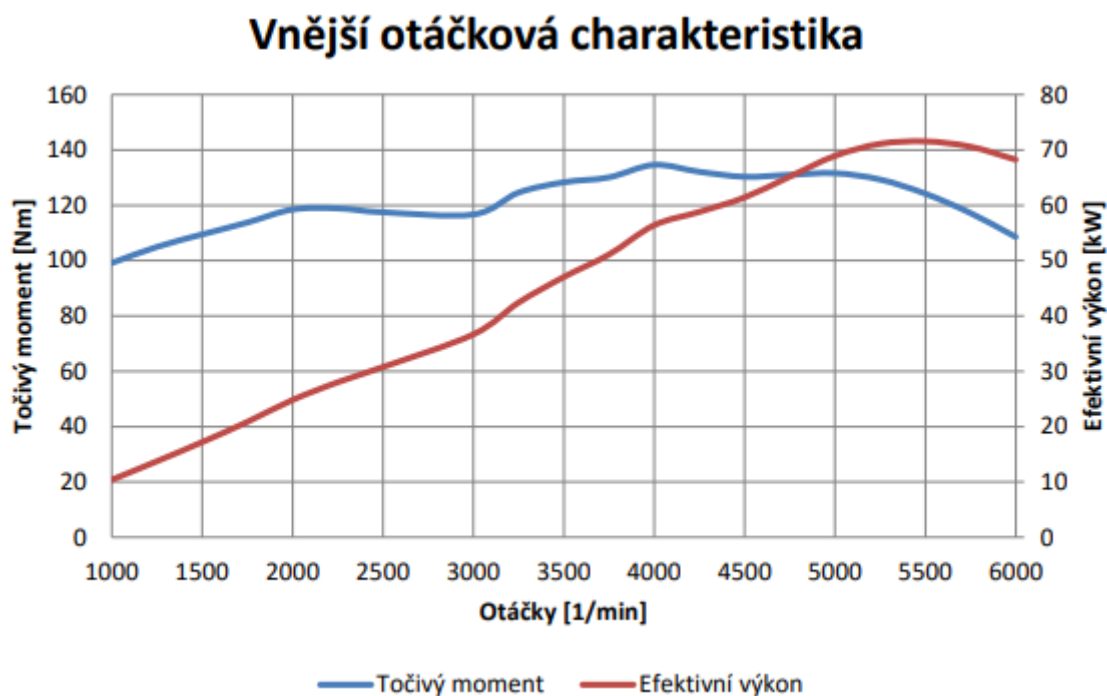
- a) Otáčkové charakteristiky
- b) Zatěžovací charakteristiky
- c) Seřizovací (regulační) charakteristiky
- d) Úplné (celkové) charakteristiky
- e) Zvláštní charakteristiky

### a) Otáčkové charakteristiky

Jak nadpis vypovídá, zajímá nás vývoj údajů, jako je výkon a podobně na změně otáček motoru. Tyto parametry se sledují při konstantní poloze ovládacího zařízení (poloha škrtkové klapky). Změny otáček motoru tak dosáhneme změnou zatížení.

Vnější otáčková charakteristika:

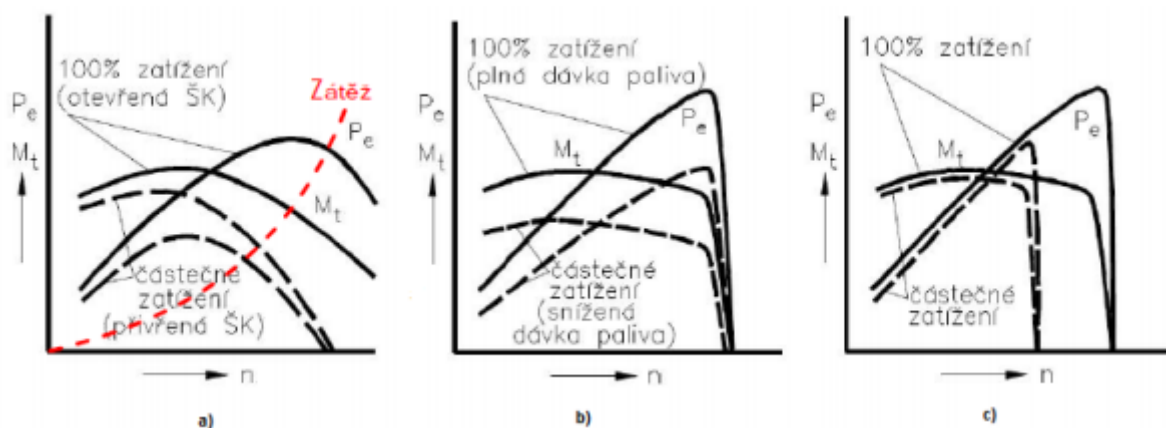
Konfigurace, při které běží motor na maximální zatížení. Toho dosáhneme plným otevřením škrtkové klapky, případně maximální možnou dávkou paliva.



Obr. č. 2.3 Otáčková charakteristika [7]

Částečné otáčkové charakteristiky:

V principu se jedná o stejný typ křivky, jako je vnější otáčková charakteristika. V tomto případě však motor neběží pod plným zatížením, ale částečným, proto označení částečná.



Obr. č. 2.4 a) zážehový motor b) vznětový motor s omezovací regulací c) vznětový motor s výkonovou regulací [7]

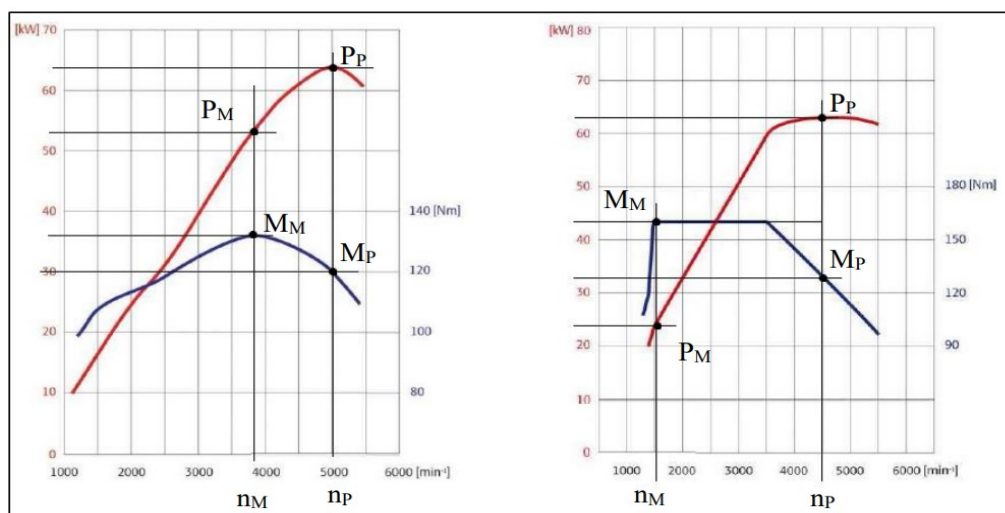
### c) Seřizovací charakteristiky

Tyto charakteristiky slouží k seřizování jednotlivých prvků tak, aby výstupní veličiny dosahovaly co nejlepších výsledků. Zde závisí především na požadavku (maximální výkon, minimální spotřeba paliva,...). Vyskytují se tak zde závislosti výkonu, točivého momentu, měrné spotřeby, atd., na předstihu, otvácího tlaku vstřikovače a podobně.

#### 2.1.6 Pružnost motoru

V případě, kdy do jednoho grafu vyneseme momentovou a výkonovou charakteristiku motoru, lze v takovém grafu vyčíst význačné body. Pomocí těchto bodů se naskýtá možnost k vyjádření dalších charakteristik, jako je například pružnost motoru. Pružnost lze rozdělit na momentovou, otáčkovou a celkovou.





Obr. č. 2.5 Parametry pružnosti motoru [7]

Momentová pružnost:

$$e_M = \frac{M_M}{M_P} [-] \quad (2.8)$$

$M_M$ ...maximální točivý moment motoru  $[\text{Nm}]$

$M_P$ ...točivý moment motoru při maximálním výkonu motoru  $[\text{Nm}]$

Otáčková pružnost:

$$e_n = \frac{n_P}{n_M} [-] \quad (2.9)$$

$n_P$ ...otáčky motoru při jeho maximálním výkonu  $[\text{min}^{-1}]$

$n_M$ ...otáčky motoru při jeho maximálním točivém momentu  $[\text{min}^{-1}]$

Celková pružnost:

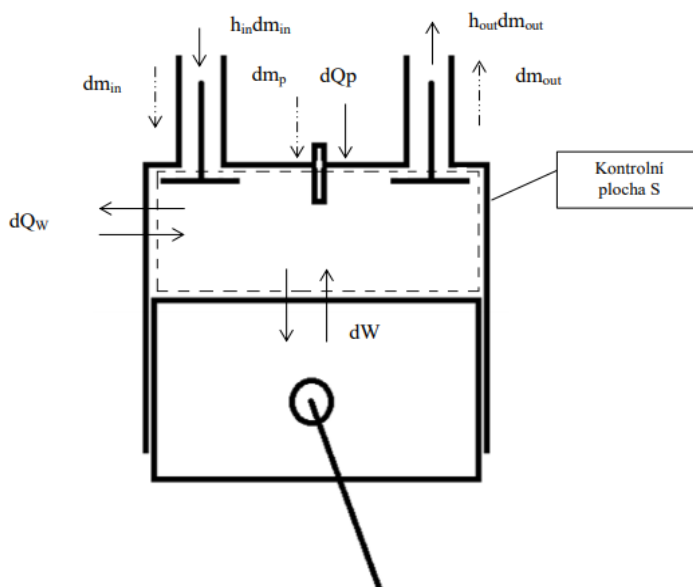
$$e_c = e_M \cdot e_n [-] \quad (2.10)$$

$e_M$ ...momentová pružnost motoru [-]

$e_n$ ...otáčková pružnost motoru [-]

## 2.2 Úvod do matematického modelování

V dnešní době, kdy je vývoj nesmírně rychlý a zároveň nákladný, je velmi obtížné kvůli každé úpravě měnit konstrukci motoru a jeho částí. Proto se reálné zkoušky nahrazují simulacemi pomocí matematických modelů. Ty zároveň umožňují zkoumat vlastnosti, které jsou u skutečného motoru jen těžko měřitelné.



Obr. č. 2.6 Energetické schéma SM [7]

### 2.2.1 Rozdělení modelů

Dle přístupu (hloubky):

0-D model termodynamického oběhu

1-D model dějů probíhajících v sacím a výukovém systému

2-D model proudění a termodynamických dějů

3-D model proudění a termodynamických dějů

Dle času:

Stacionární

Nestacionární

#### 0-D model

Pro vytvoření tohoto druhu modelu potřebuji rovnice popisující zákon zachování hmoty, energie a stavovou rovnici. Jedná se o nutné a postačující podmínky k sestavení soustavy rovnic pro řešení 0-D modelu. [2]

Stavová rovnice

$$mr \frac{dT}{d\alpha} - V \frac{dp}{d\alpha} + rT \frac{dm}{d\alpha} = p \frac{dV}{d\alpha} \quad (2.11)$$

Počáteční podmínky iterace:

Pokud mám otevřený systém, což v případě reálného spalovacího motoru mám, je možné simulovat oběh včetně výměny náplně válce. V tom případě vypočítané hodnoty  $m, p$  a  $T$  slouží jako vstup pro další výpočty. Výpočty se opakují do doby, kdy se přestanou vstupní hodnoty měnit.

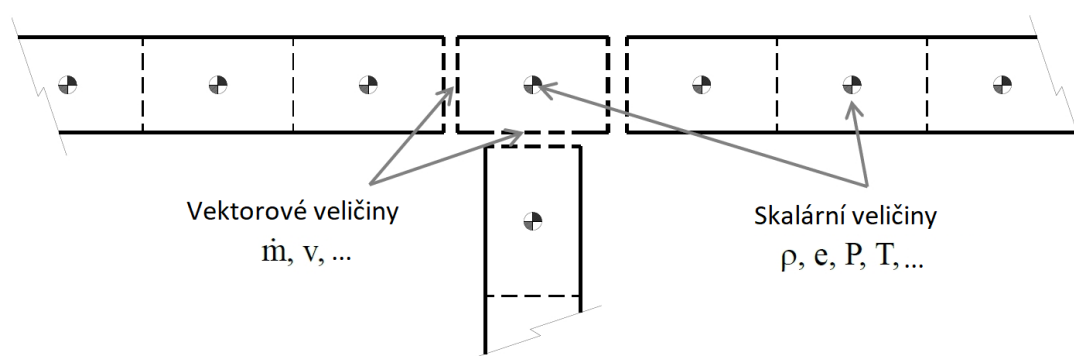
#### 1-D model

Jelikož se v rámci této práce budu dále zabývat výhradně tímto typem modelu, budu se mu nyní věnovat podrobněji. Průtokový model zahrnuje řešení Navier-Stokesových rovnic.

A to rovnice zachování kontinuity, hybnosti a energie. Tyto rozměry řešíme v jednom rozměru (dimenzi), a tím je průměr ve směru proudění. Existují dvě metody časové integrace, a to metoda s časovým krokem jako proměnnou, nebo limitou. Tyto metody integrace obsahují explicitní a implicitní integrátor. [2]

Hlavní proměnné při řešení explicitní metodou jsou hmotnostní tok, hustota a vnitřní energie. V případě implicitní metody to jsou hmotnostní tok, tlak a celková entalpie.

Celkový systém je založen na rozdělení do několika dílčích objemů, ve kterých je průtok reprezentován konkrétním objemem. Taktéž každé potrubí je rozděleno na jeden či více objemů. Tyto dílčí objemy jsou propojeny hranicemi. Skalární proměnné, jako je tlak, teplota, hustota, apod., se považují za stálé v každém objemu. Pro každou hranici jsou vypočteny vektorové proměnné (hmotnostní tok, rychlost, hmotnostní frakce). Tento princip se nazývá “rozdělená mřížka”. [4]



Obr. č. 2.7 Struktura systému pro modelování [4]

Rovnice kontinuity:

$$\frac{dm}{dt} = \sum_{\text{hranice}} \dot{m} \quad (2.12)$$

$\dot{m}$ ...hmotnostní průtok [ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

Rovnice zachování energie:

$$\frac{d(me)}{dt} = -p \frac{dV}{dt} + \sum_{hranice} (\dot{m}H) - hA_S(T_{kapalina} - T_{stěna}) \quad (2.13)$$

e...totální specifická vnitřní energie [J]

H...entalpie [J]

h...součinitel přestupu tepla [-]

A<sub>S</sub>...velikost plochy, kterou teplo prostupuje [m<sup>2</sup>]

T<sub>tekutina</sub>...teplota tekutiny [K]

T<sub>Stěna</sub>...teplota stěny [K]

Momentová rovnice:

$$\frac{d\dot{m}}{dt} = \frac{dpA + \sum_{hranice}(\dot{m}) - 4C_f \frac{\rho u |u|}{2} \frac{dx A}{D} - K_p \left( \frac{1}{2} \rho u |u| \right) A}{dx} \quad (2.14)$$

A...průřez, kterým protéká tekutina [m<sup>3</sup>]

C<sub>f</sub>...třecí faktor [-]

u...rychlost proudění na hranici sekce [m.s<sup>-1</sup>]

D...ekvivalentní průměr [m]

K<sub>P</sub>...koeficient tlakové ztráty [-]

x...délka potrubí [m]

Explicitní metoda:

Teplota a tlak se v každém kroku vypočítají následujícím způsobem.

1. Rovnice kontinuity a zachování energie dávají hmotnost a energii v objemu.
2. Pokud známe hmotnost a objem, je možné získat hodnoty hustoty a energie.
3. Stavová rovnice definuje hustotu a energii již vypočtenou pro tento krok. Taktéž je zohledněn přenos hmoty během této iterace.

Implicitní metoda:

1. V systému je minimální dynamika vln, případně vlny jsou přesně předvídaný.
2. Maximální machovo číslo v systému je menší než 0,3.

Vzhledem k tomu, že je tato metoda iterativní, je nutno v každém kroku zkontrolovat podmínku konvergence.

### 2.2.2 Vibeho funkce

Tuto funkci odvodil Vibe, který pocházel z Ukrajiny. Pomocí této funkce jsme schopni pomocí výpočtu vyjádřit průběh hoření. To nám slouží k následnému vyjádření rychlosti hoření v závislosti na poloze natočení klikového hřídele. [2]

Základní tvar:

$$x_h = 1 - e^{-ay^{m+1}} \quad (2.15)$$

$x_h$ ...průběh hoření v ose x [-]

$a$ ...podíl nespáleného paliva ve válci [-]

$$y = \frac{\varphi}{\varphi_B} \quad (2.16)$$

$y_h$ ... fáze hoření v ose y [-]

$\varphi$ ...aktuální úhel od počátku hoření [°]



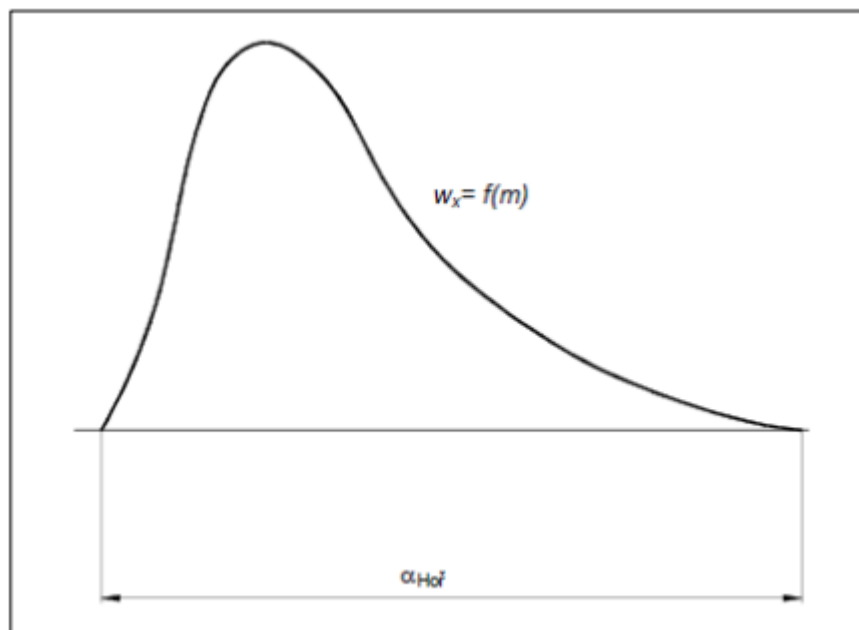
$\varphi_B$ ...celkový úhel hoření [ $^\circ$ ]

Podíl nespáleného paliva ve válci:

$$a = -\ln.(1 - \eta_{CH}) \quad (2.17)$$

### **Zážehový motor**

Jelikož se v práci vyskytuje zážehový motor, v obrázku č. 2.8 lze vidět průběh rychlosti hoření v závislosti na úhlu hoření. [2]

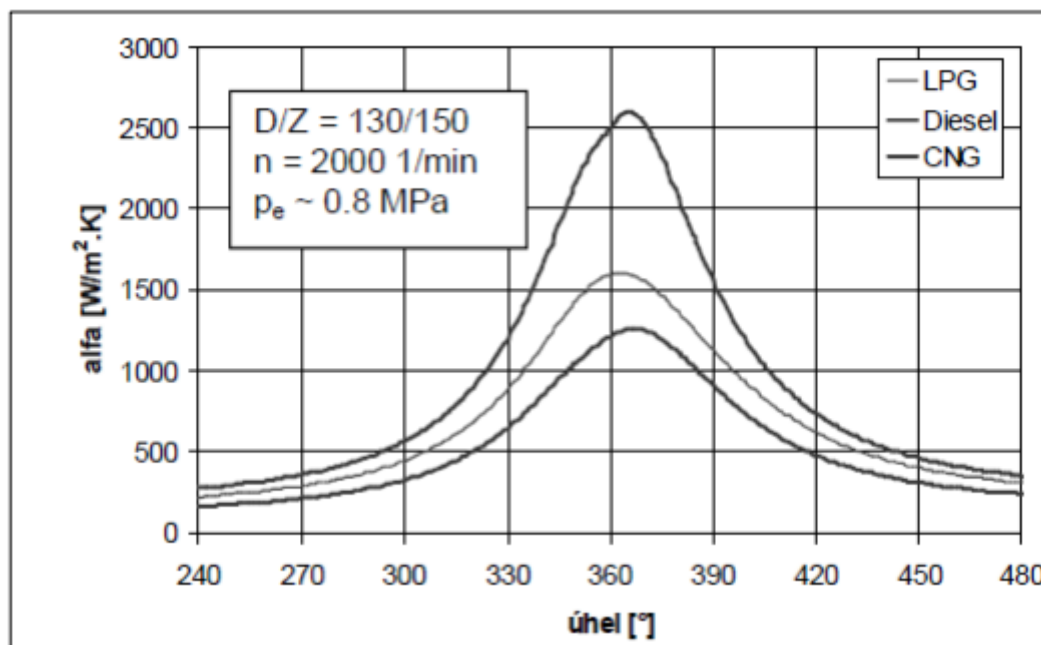


*Obr. č. 2.8 Průběh hoření zážehového motoru [7]*

### **2.2.3 Přestup tepla**

Odvedené teplo, které vzniká v náplni válci, se převádí stěnami válce v hlavní míře přestupem. Do dalších chladnějších částí motoru se toto teplo dostává vedením. Z těchto

partií se dostává teplo dále přestupem nebo sáláním do chladicí kapaliny a prostřední kolem motoru. [2]



Obr. č. 2.9 Součinitele přestupu tepla pro různá paliva [7]

Přenos tepla z kapalin uvnitř potrubí do stěn se vypočítá pomocí koeficientů přenosu tepla. Tento koeficient se počítá v každém časovém rozmezí z rychlosti tekutiny, termofyzikálních vlastností a drsnosti povrchu stěny. U hladkých trubek se koeficient přenosu tepla vypočítá jednou ze 4 možností. [4]

Přestup tepla uvnitř potrubí a jeho spojovacích částí do stěn je počítán pomocí součinitele přestupu tepla následujícím vztahem: [4]

$$h = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot C_f \cdot \rho \cdot U_{eff} \cdot C_p \cdot Pr^{\left(-\frac{2}{3}\right)} \quad (2.18)$$

Kde:

h...součinitel přestupu tepla [-]

$U_{eff}$ ...vnější hranice efektivní rychlosti [m.s<sup>-1</sup>]

$C_p$ ...charakteristické teplo [J]

$Pr$ ...Prandlotovo číslo [-]

V případě, kdy je povrch trubek drsný:

$$h_{drsná} = h_g \cdot \left( \frac{C_{f,drsná}}{C_f} \right)^i \quad (2.19)$$

$h_{drsná}$ ...součinitel přestupu tepla potrubí s drsnou stěnou [-]

$C_{f,drsná}$ ...třecí faktor potrubí s drsnou stěnou [-]

$i$ ...exponent [-]

$$i = 0,68 \cdot Pr^{0,215} \quad (2.20)$$

## 2.2.4 Vnitřní aerodynamika

### Průtokový koeficient

V případě ventilů, sacích (výfukových) kanálů a dalších částí, kterými protéká pracovní látka, je důležitým parametrem průtokový koeficient. Ten určuje, jaké množství látky proteče ve skutečném potrubí, které je ovlivněno ztrátami. Je definován jako poměr mezi efektivní průtokovou plochou a referenční průtokovou plochou. [4]

Koeficienty se dále dělí pro kapalné a plynné látky. Jelikož se v této práci zabývám pouze prouděním plynných látek, zaměřím se na tuto část.

Průtokový koeficient plynů:

$$c_d = \frac{Q_{skut}}{Q_{teor}} \quad (2.21)$$

$c_d$ ...průtokový koeficient [-]

$Q_{skut}$ ...skutečný objemový průtok [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$Q_{teor}$ ...teoretický objemový průtok [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$$c_d = \frac{S_{ef}}{S_{ref}} \quad (2.22)$$

$S_{ef}$ ...velikost efektivní plochy [ $\text{m}^2$ ]

$S_{ref}$ ...velikost referenční plochy [ $\text{m}^2$ ]

### 3 Popis konkrétního spalovacího motoru

A nyní se dostanu k samotnému jádru této práce, a tím je konkrétní spalovací motor, kterému se budu dále věnovat a pracovat s ním. V první řadě je nutné si tento motor představit podrobněji včetně úprav, které byly nezbytné z důvodu splnění pravidla soutěže Formula student.

Motor, se kterým pracuji, pochází ze sériového motocyklu Yamaha FZ6 Fazer, jehož produkce probíhala v letech 2004-2009. Důvod, proč tento agregát využíváme, je dostupnost náhradních dílů i samotného motoru a jeho vysoká odolnost.

V následující tabulce je přehled základních technických parametrů tohoto motoru:

*Tab. č. 3.1 Parametry motocyklu Yamaha FZ 6 [vlastní]*

Pracovní cyklus [-]	Čtyřtákní
Počet válců [-]	4
Počet ventilů na válec [-]	4
Vrtání válce [mm]	65,5
Zdvih pístu [mm]	44,5
Objem [cm <sup>3</sup> ]	600
Výkon [kW]	72
Krouticí moment [Nm]	63,1
Počet převodových stupňů [-]	6

Motor ze sériové produkce je konstruován pro použití v motocyklu. Tomu odpovídá tvar airboxu, výfukového potrubí a dalších částí. Aby bylo možné motor použít v závodním automobilu, je nutné ho k tomuto vhodným způsobem upravit.



*Obr. č. 3.1 Yamaha FZ6 [8]*

Originální motor používá 4 škrtkové klapky na konci sání. Rozvod motoru je řešen dvěma vačkovými hřídeli a řetězem. První obstarává zdvih sacích a druhá výfukových ventilů.

### **3.1 Pravidla soutěže FSAE týkající se spalovacího motoru**

V rámci soutěže Formula student jsou předepsána pravidla pro všechny zúčastněné týmy, které je nutné dodržet. Pravidla zasahují také do oblasti motoru a pohonného ústrojí. Dle typu pohonu jsou rozdělena pro spalovací motory a pro elektrické formule. V první řadě je tak nutné znát tato pravidla a poté jim přizpůsobit motor, který tým využívá. V současné době je v pravidlech oblasti spalovacích motorů vyčleněno přibližně 15 stran. Regulace se týká jak mechanických, tak elektronických částí. Zde se budu zabývat především pravidly, která jsou zaměřena na mechanické části a na části, které mají přímý dopad na díly, které jsou použity v modelu.

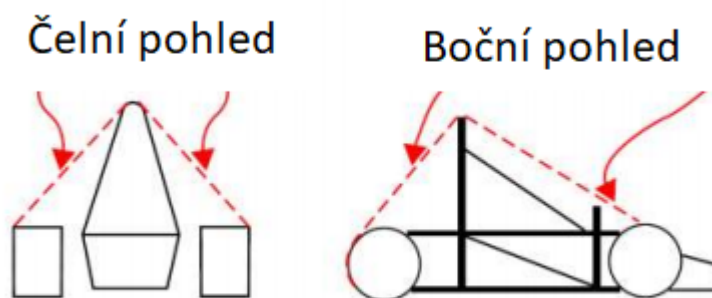
Dle těchto regulí musí být použitý spalovací motor pístový se čtyřdobým spalovacím cyklem a maximálním objemem válců 710cm<sup>3</sup>. Jakýkoliv hybridní pohonný systém je zakázán. Zároveň pravidla umožňují upravovat motor v rámci pravidel samotných. [5]

Pravidla zároveň nezakazují použití více než jednoho motoru. Ovšem celkový objem válců musí splňovat předchozí podmínku a přívod vzduchu pro oba motory musí vést procházet skrz jeden sací systém. [5]

Každé vozidlo musí být vybaveno palubním startérem, který musí být použit za všech okolností k jeho nastartování. [5]

Veškeré části sacího systému, včetně kontroly stavu paliva, se musí vejít do vymezené zóny na obr. č. 3.2. [5]





Obr. č. 3.2 Zástavbová regulace dle pravidel FSAE [5]

Sací potrubí musí být pevně připevněno k bloku motoru nebo k hlavě válců pomocí držáků, případně mechanického spojovacího materiálu. Části sacího systému s výraznou hmotností by měly být podepřeny dalšími podporami, aby nedocházelo k velkému namáhání. [5]

### 3.1.1 Plyn a ovládání plynu

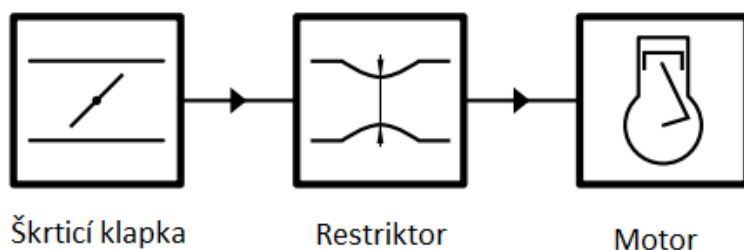
Vozidlo musí být vybaveno karburátorem nebo škrticí klapkou. Konstrukce těchto částí je dále neomezena. Ovládání plynu musí být mechanické pomocí lanka či táhel. V případě použití elektronického ovládání je nutné splnit další pravidla. Chod lanka nebo táhel musí být hladký, bez zadrhávání. Návrat lanka musí být zajištěn nejméně dvěma vratnými pružinami. Veškeré části lankového vedení musí být vzdáleny nejméně 50,8mm od výfukového potrubí a mimo dosah výfukových plynů. [5]

### 3.1.2 Restriktor

Restriktor je součástí sacího systému, která omezuje množství vzduchu proudícího do motoru. Má tak negativní vliv na jeho maximální výkon. Rozměry restriktoru jsou dány typem paliva. V případě použití benzínu je maximální povolený průměr 20mm, v případě použití ethanolu 19mm. [5]

Povolené uspořádání komponentů sání je znázorněno na obrázku 3.3. To se dělí dle typu plnění motoru, a to na atmosférické a přeplňované motory. Jelikož se zabývám

atmosférickým plněním motoru, je na schématu vidět povinné uspořádání tohoto typu motoru. [5]



*Obr. č. 3.3 Schéma zapojení motoru [5]*

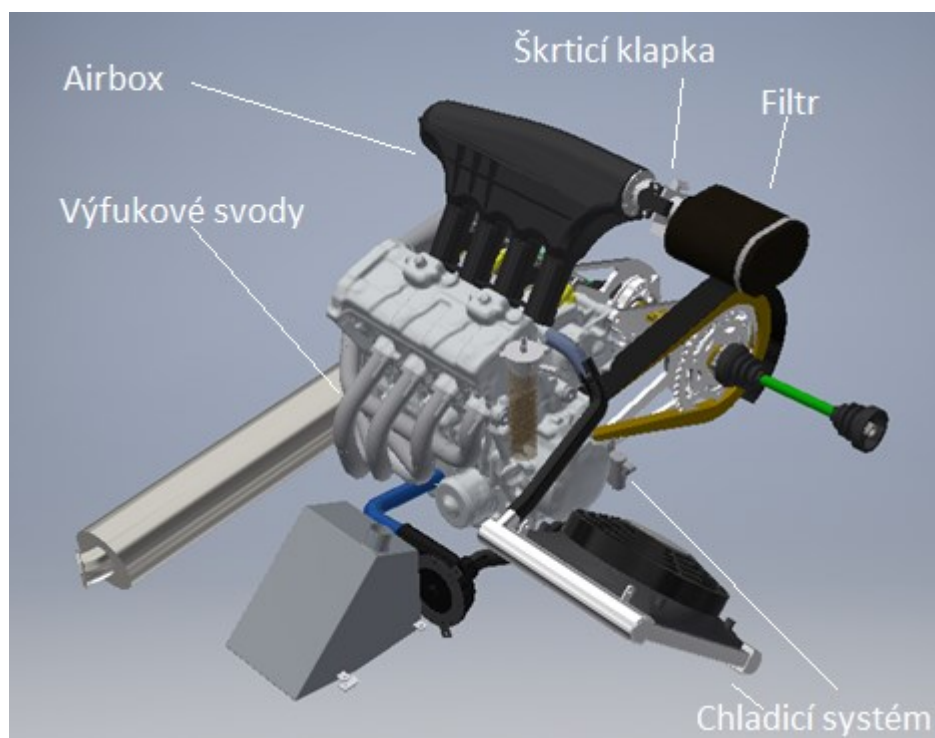
### 3.1.3 Výfukový systém

Vedení výfukového potrubí musí být provedeno tak, aby neovlivňovalo řidiče za žádných okolností. Umístění výfukového potrubí musí být do 450mm za osou zadní nápravy a nesmí být výš než 600mm nad zemí. Části, které se nacházejí před hlavním ochranným obloukem rámu, musí být umístěny tak, aby nedošlo ke kontaktu s osobami stojícími poblíž. [5]

Zároveň je také limitován hluk, který smí vozidlo vydávat. Tato úroveň je stanovena pro 2 provozní stavy. Při volnoběhu je povolena maximální hlučnost vozidla 103dB a 110dB při střední pístové rychlosti 15,25m/s. [5]

## 3.2 Úpravy konkrétního SM

Přehled všech úprav, které byly realizovány



*Obr. č. 3.4 Motor s úpravami Formula TU Ostrava [vlastní]*

### 3.2.1 Dle pravidel

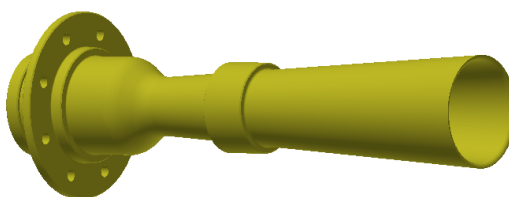
Aby bylo možné tento agregát použít v útrokách formule, je potřeba několika úprav. Ty vycházejí v první řadě z pravidel. Jak bylo v pravidlech znázorněno ve schématu, každý motor může používat pouze 1 škrticí klapku. Dalším nutným prvkem je použití restriktoru. Tím tedy zcela odpadá možnost použít originálního sacího systému a je nutné navrhnout vlastní. Ten se sestává ze vzduchového filtru, škrticí klapky, restriktoru a airboxu.

## Škrticí klapka

Originální motor je vybaven 4 škrticími klapkami, které svou polohou omezují vstup vzduchu do SM. Aby vozidlo vyhovělo pravidlům, jsou tyto klapky nahrazené jedinou, která je zapojena dle požadavků pravidel na pořadí prvků sacího systému.

## Restriktor

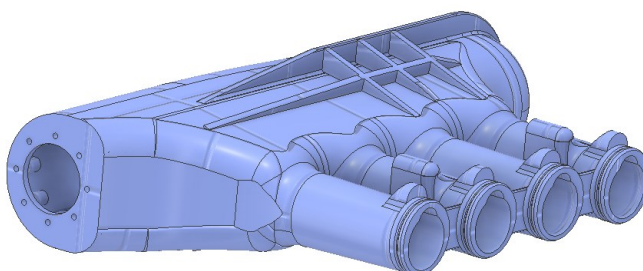
Dalším povinným prvkem je restriktor. Tým Formula TU Ostrava využívá restriktor, který si sám vyvinul a vyrobil. Ten má v nejužším místě průměr 20 mm.



*Obr. č. 3.5 Model restriktoru [vlastní]*

## Airbox (plénium)

Jedná se o část sacího systému, která sama o sobě není příliš regulována pravidly. Její konstrukce je však velmi důležitá pro distribuci pracovní látky do jednotlivých válců. Zde je požadováno rovnoměrné rozdělení proudu mezi jednotlivé válce a zároveň je důležité distribuovat maximální možné množství vzduchu, od kterého se odvíjí výkon vozidla.



*Obr. č. 3.6 Model airboxu [vlastní]*

### **3.2.2 Další úpravy**

#### **Převodovka**

Originální převodovka má 6 rychlostních stupňů, avšak vzhledem k sekvenčnímu systému řazení je 1. stupeň obtížně využitelný. Jelikož je použit pneumatický systém řazení, který nepracuje s takovou citlivostí jako noha jezdce na motorce a zařadit neutrál by bylo takřka nemožné.

#### **Olejová vana**

Namísto běžné olejové vany je navržena vana vlastní konstrukce se sníženým dnem tak, aby bylo možné motor umístit ve voze co nejnižší, a tím dosáhnout co nejnižší polohy těžiště.

#### **Výfukové svody**

Výfukové svody, které se nacházejí na motocyklu, jsou přizpůsobeny architektuře rámu a stavbě motocyklu. Proto je nutné tyto svody upravit pro zástavbu do nového rámu formule.

#### **Tlumič výfuku**

Jelikož jsou požadovány nároky na hluk, kterého smí formule maximálně dosahovat, je nutné upravit také tuto tlumící část výfuku. Tým využívá tlumič vlastní výroby, která je vyrobena z karbonového kompozitu.

#### **Chladicí systém**

Sériový chladicí systém motoru využívá sloučeného vodního okruhu pro chlazení motoru jako takového i motorového oleje skrze vodní výměník. Celkově je systém na motocyklu navržen pro náporové sání vzduchu z čela motocyklu. Jelikož je motor umístěn uprostřed vozu, nelze tohoto efektu dostatečně využívat. Z tohoto důvodu je vůz vybaven soustavou 2 nezávislých chladičů. Jeden slouží k chlazení chladicí kapaliny a druhý k chlazení motorového oleje. V obou případech se jedná o chladiče pracující na principu protékajícího chladicího média (vzduchu).

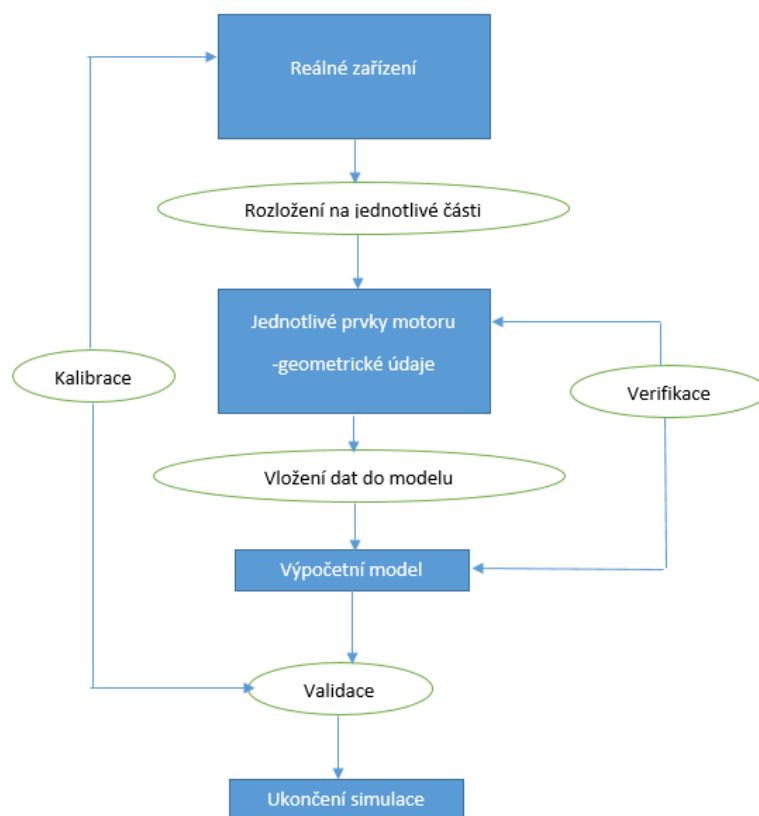
## 4 Návrh metodiky tvorby modelu

V této kapitole se budu zabývat obecným postupem při tvorbě modelu. To znamená, jaké kroky je nutné dodržet, aby byl výsledný model kompletní a připraven k aplikaci.

Tvorbu modelu lze rozdělit do těchto základních bodů:

1. Základní struktura modelu
2. Získání konkrétních geometrických parametrů
3. Vložení dané geometrie do modelu
4. Nastavení okrajových podmínek
5. Vyhodnocení a validace

Chceme-li vytvořit určitý model reálného zařízení, je důležité dobře porozumět zařízení jako celku ale i jeho detailům, abychom byli schopni pochopit veškeré souvislosti, které se v něm odehrávají.



*Obr. č. 4.1 Postup tvorby modelu a vyhodnocení simulace [vlastní]*

## **Reálné zařízení**

Označuje reálné zařízení, ze kterého vycházíme při dalším postupu, kterému se chceme maximálně přiblížit.

## **Struktura zařízení**

Popis reálného zařízení převodem na schéma, které je tvořeno konstrukčními celky, případně konkrétními díly. Musí být zpracováno dostatečně podobně a zároveň tak, aby bylo přehledné a jasné srozumitelné.

## **Numerický model**

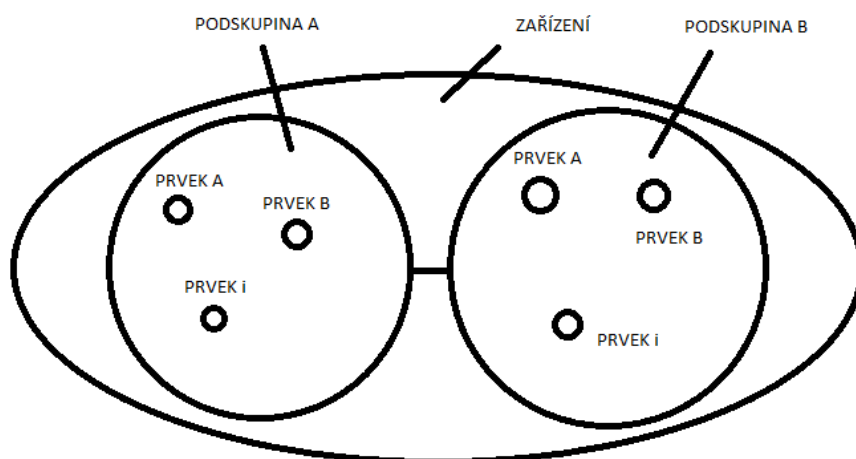
Jedná se o nahrazení struktury v podobě schématu jednotlivými numerickými modely, které této struktuře odpovídají.

Verifikace slouží k ověření vstupujících dat a jejich vhodnosti pro danou aplikaci.

Validace zase slouží k tomu, aby bylo zřejmé, že numerický model dostatečně odpovídá skutečnému systému a nárokům, která na tento model klademe.

### 1) Základní struktura modelu

Jak bylo zmíněno v předchozím textu, jedná se o popis reálného zařízení pomocí konstrukčních podskupin a pomocí *i* dílčích prvků dané podskupiny.



Obr. č. 4.2 Schéma rozložení zařízení [vlastní]

Jednotlivé podskupiny jsou spolu provázány. Toto navázání může probíhat několik způsoby, například sériově, paralelně, apod. Pro prvky platí to podobné jako pro podskupiny. Mohou na sebe navazovat přímo i nepřímo, sériově nebo paralelně.

### 2) Získání konkrétních geometrických parametrů

Způsoby, jakými lze geometrické parametry získat:

- přímým měřením pomocí měřidel
- pomocí měřících přípravků
- z modelu pomocí příslušného software



- výkresová dokumentace, manuál, ...

### 3) Vložení dané geometrie do modelu

V momentě, kdy známe veškeré potřebné geometrické parametry všech prvků, můžeme tyto prvky postupně vkládat a charakterizovat jej v modelu pomocí jeho geometrie.

### 4) Nastavení okrajových podmínek

Po dokončení specifikace základní geometrie modelu je na řadě nastavení veškerých okrajových podmínek, které jsou klíčové pro běh samotné simulace a pro dosažení požadované přesnosti. Tyto okrajové podmínky se týkají jak samotných prvků, tak nastavení běhu modelu takovým způsobem, aby fungoval v požadovaném režimu s požadovanou přesností.

### 5) Vyhodnocení a validace

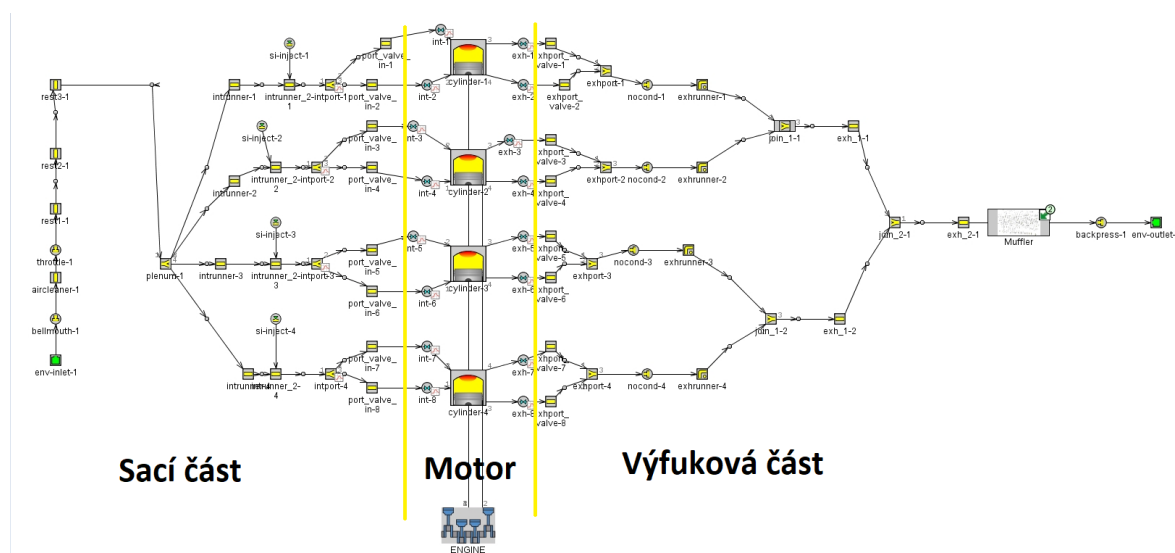
V době, kdy je model připraven ke spuštění, provedeme spuštění simulace. Z této simulace vyčteme výsledky, které nás zajímají, což mohou být různé parametry, atd. Výsledky následně porovnáme s reálným systémem a zjistíme, zda jsou pro nás dostatečné, či nikoliv. Pokud ano, model již není nutné dál upravovat. Pokud nevyhovují, je nutné se vrátit ke kroku 3, případně 2, pokud máme nedostatečné množství vstupních dat pro tvorbu modelu.

## 5 Tvorba a validace výpočetního modelu

V této kapitole se budu věnovat tvorbě konkrétního modelu, na kterém jsem pracoval v programu GT-ISE v2018. Bude zde uplatněn postup, který je popsán v předešlé kapitole. Nyní popíšu celkový postup, jakým jsem model vytvářel a interpretovat výstupy, které jsem následně získal.

### 5.1 Základní struktura modelu

Celé ústrojí spalovacího motoru se skládá z několika celků a jedná se o poměrně rozsáhlý systém. Pro lepší přehlednost je dobré si takový systém rozdělit na dílčí celky a přistupovat k nim jednotlivě.



Obr. č. 5.1 Struktura modelu [vlastní]

V tento moment jsou patrné hlavní celky, proto budu dále detailně popisovat tvorbu těchto celků, a to ve směru postupu pracovní látky.

## 5.2 Získávání geometrických parametrů

Aby bylo přehledné, pro jaké součásti parametry potřebuji a konkrétně jaký typ parametru, sestrojil jsem tabulku, jejíž vzor můžete vidět níž v tabulce č. 5.1. Po vyplnění této tabulky tak mám k dispozici veškeré potřebné geometrické údaje o motoru. Kompletně vyplněnou tabulku naleznete v příloze A.

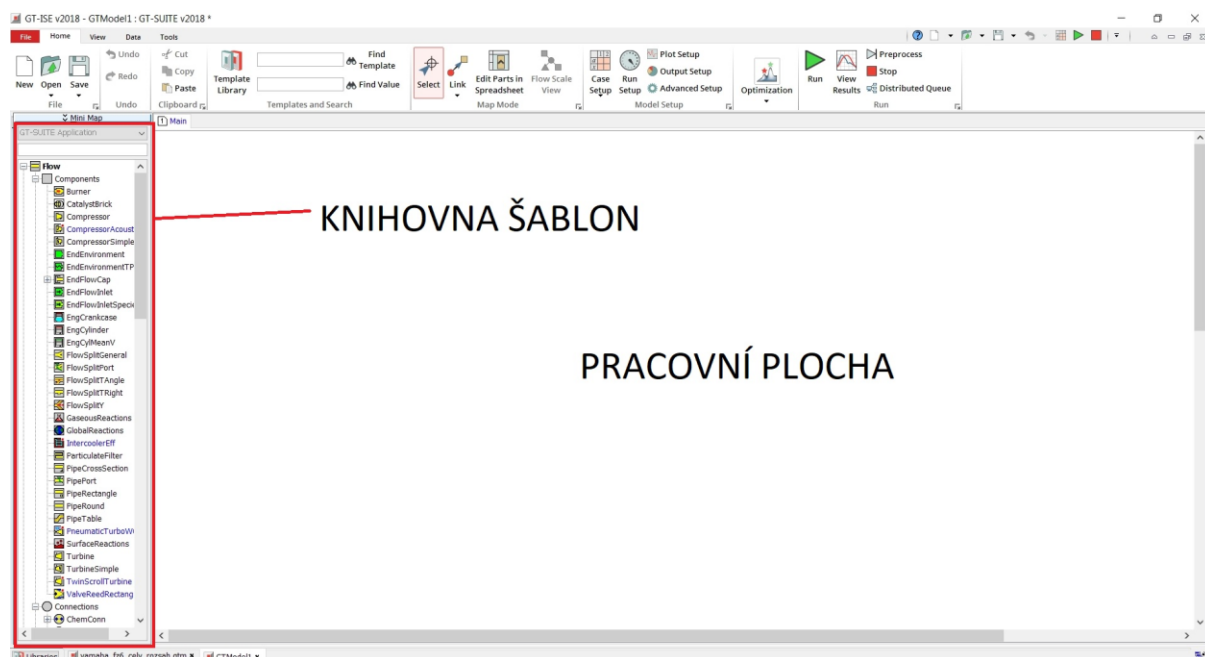
Tab. č. 5.1 Vzor tabulky pro vstupní geometrii do modelu [vlastní]

Konstrukční celek	Část	Geometrie	Rozměr	Materiál
Sací systém	Škrticí klapka	Průměr klapky [mm]		
	Restriktor 1	Vstupní průměr [mm]		
		Výstupní průměr [mm]		
	Restriktor 2	Vstupní průměr [mm]		
		Výstupní průměr [mm]		
	Restriktor 3	Vstupní průměr [mm]		
		Výstupní průměr [mm]		
	Plenum	Objem [mm <sup>3</sup> ]		
	Runner 1	Délka [mm]		
		Průměr [mm]		
	Runner2	Délka [mm]		
		Průměr [mm]		
	Sací kanál	Objem [mm <sup>3</sup> ]		

Tato geometrická data jsem získat ručním měřením, dále měřením ploch a objemů v modelech. Pro průběh zdvihu ventilů bylo sestrojeno zařízení, kterým byl měřen úhel natočení vačkového hřídele a vzdálenost, o jakou se otevřel ventil. Tato data jsou dále popsána.

## 5.3 Vložení geometrie do modelu

Pro tuto aplikaci využívám součást systém GT-ISE, která se jmenuje GT-SUITE. Po vytvoření nového souboru se mi nabídne pracovní plocha, na kterou mohu umisťovat jednotlivé prvky. Abych mohl tyto prvky vytvořit, k tomuto účelu slouží knihovna se šablonami, které jsou uzpůsobeny aplikaci pro spalovací motor. Využití a nastavení těchto šablon bude dále popsáno.



Obr. č. 5.2 Pracovní rozhraní GT-SUITE [vlastní]

### 5.3.1 Sací systém

Na obrázku č. 5.3 je znázorněno schéma sacího systému, která se skládá ze vzduchového filtru, škrticí klapky, pléna (airbox) a sacích kanálů. Tyto části jsou mezi sebou navzájem propojeny vazbami. V této kapitole je tedy popsáno, jakým způsobem byly v modelu jednotlivé prvky postupně definovány a vkládány.



Obr. č. 5.3 Schéma sacího systému [vlastní]

### Vzduchový filtr

Jelikož je to ve skutečnosti výrobek z pěny, jehož vlastnosti by se obtížně modelovaly, bude v modelu zjednodušen jako kus trubky, která odpovídá jeho rozměrům.

☒ Main
 ☒ Thermal
 ☒ Pressure Drop
 ☒ Plots

Attribute	Unit	Object Value
<b>Basic Geometry and Initial Conditions</b>		
Diameter at Inlet End	mm	160
Diameter at Outlet End	mm	160
Length	mm	250
Discretization Length	mm	26.2
Initial State Name		initial
<b>Surface Finish</b>		
<input type="radio"/> Smooth <input checked="" type="radio"/> Roughness from Material <input type="radio"/> Sand Roughness		smooth_plastic
<b>Options</b>		
Radius of Bend	mm	ign
Angle of Bend	deg	ign
Number of Identical Pipes		def (=1)
Model Gravity or Pipe Motion		<input type="checkbox"/>
Animate Results in 3D		<input type="checkbox"/>

Obr. č. 5.4 Nastavení parametrů vzduchového filtru [vlastní]

## Škrticí klapka

Škrticí klapka reguluje množství vzduchu, které vstupuje do motoru a tvoří přechod mezi vzduchovým filtrem a restriktorem. Z tohoto důvodu je definovaná jako napojení s následujícími parametry. Jako výchozí šablonu jsem použil „OrificeConn“.

Template: OrificeConn - Orifice/Restriction Between Two Flow Components

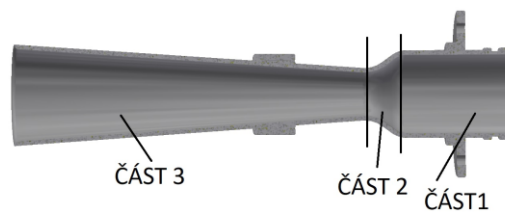
☒ Main
 ☒ Options
 ☒ Plots

Attribute	Unit	Object Value
<input checked="" type="radio"/> Hole Diameter	See Case...	[throttle]...
<input type="radio"/> Geometric Area	mm <sup>2</sup>	def
<input type="radio"/> Wetted Perimeter	mm	def (=circle)
Number of Holes		def (=1)
Forward Discharge Coefficient		def
Reverse Discharge Coefficient		def
Hole Thickness	mm	def (=0)
Rounded Corner Radius (only if Discharge Coefficient = "d...	mm	ign

Obr. č. 5.5 Nastavení parametrů škrticí klapky [vlastní]

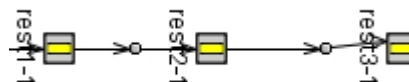
## Restriktor

Jedná se o díl se složitější geometrií, protože plocha jeho průřezu není konstantní. Z tohoto důvodu jsem se rozhodnul pro zjednodušení tento díl rozdělit na 3 podcelky, které mohu definovat jednoduše jako rovnou trubku, případně jako kuželovou trubku s počátečním a koncovým průřezem. Pro tuto aplikaci jsem použil šablonu PipeRound.



Obr. č. 5.6 Rozdělení geometrie restriktoru [vlastní]

Na obr č. 5.7 je vidět sestavení restriktoru v software GT-SUITE z jednotlivých částí, které jsou vzájemně provázány vazbami



Obr. č. 5.7 Podoba restriktoru v modelu [vlastní]

## Plénium

V tomto případě je pro nás hlavním parametrem objem vzduchu, kterého plénium nabývá. Je tak definováno vlastním objemem. Dále, jelikož propojuje restriktor, škrťací klapku, atd. s runnery, musím definovat tato napojení v prostoru. Nastavení těchto okrajových podmínek pro napojení lze najít v Příloze C. Tento postup platí také obdobně pro nastavení dalších dílů pomocí tohoto nástroje. Jako výchozí šablona slouží FlowSplitGeneral

<input checked="" type="checkbox"/> Main <input checked="" type="checkbox"/> Thermal <input checked="" type="checkbox"/> Pressure Drop <input checked="" type="checkbox"/> Boundary Data <input checked="" type="checkbox"/> Plots <input checked="" type="checkbox"/> 3D Flow Split			
	Attribute	Unit	Object Value
<b>Basic Geometry and Initial Conditions</b>			
	Volume	mm <sup>3</sup>	2829176 ...
	Surface Area	mm <sup>2</sup>	def ...
	Initial State Name		initial ...
<b>Surface Finish</b>			
<input type="radio"/>	Smooth		
<input checked="" type="radio"/>	Roughness from Material		smooth_plastic
<input type="radio"/>	Sand Roughness	mm	
<b>Options</b>			
	Number of Identical Flowsplits		def (=1) ...
<input type="checkbox"/>	Gravity or Body Force Acceleration (See Help)	m/s <sup>2</sup>	
	Animate Results in 3D		<input type="checkbox"/>

Obr. č. 5.8 Nastavení parametrů pléna [vlastní]

<div> <span>✓ Main</span> <span>✓ Thermal</span> <span>✓ Pressure Drop</span> <span>✓ Boundary Data</span> <span>Plots</span> <span>3D Flow Split</span> </div>							
	Attribute	Unit	Boundary #1	Boundary #2	Boundary #3	Boundary #4	Boundary #5
	Link Name or Number		1...	3...	2...	4...	5...
<input type="radio"/>	Angle (Planar Configuration)						
	Angle wrt X-axis (3D)		90.0...	90.0...	90.0...	90.0...	90.0...
<input checked="" type="radio"/>	Angle wrt Y-axis (3D)		90.0...	90.0...	90.0...	90.0...	90.0...
	Angle wrt Z-axis (3D)		0.0...	180.0...	180.0...	180.0...	180.0...
	Characteristic Length	mm	15.028...	40.0...	40.0...	40.0...	40.0...
	Expansion Diameter	mm	175.436...	107.553...	107.553...	107.553...	107.553...

Obr. č. 5.9 Nastavení okrajových podmínek pro napojení pléna na další části [vlastní]

## Runner

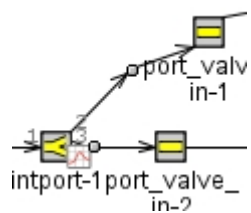
Je to část sacího systému, která napojuje plénium k hlavě motoru a k sacím kanálkům. Jeho průměr je dán napojením na hlavu motoru a charakteristickým rozměrem je délka tohoto potrubí. Jako šablona slouží PipeRound. Jelikož do této části vstupuje taktéž vstřikovač paliva, rozdělil jsem ji na 2 části tak, aby bylo zřejmé, kde je vstřikovač napojen.

<div> <span>✓ Main</span> <span>✓ Thermal</span> <span>✓ Pressure Drop</span> <span>Plots</span> </div>				
	Attribute	Unit	Object Value	Inrunner-1 override
<b>Basic Geometry and Initial Conditions</b>				
	Diameter at Inlet End	mm	38.5	...
	Diameter at Outlet End	mm	38.5	...
	Length	mm	95	...
	Discretization Length	mm	26.2	...
	Initial State Name		initial	...
<b>Surface Finish</b>				
<input type="radio"/>	Smooth			
<input checked="" type="radio"/>	Roughness from Material		smooth_plastic	
<input type="radio"/>	Sand Roughness	mm		
<b>Options</b>				
	Radius of Bend	mm	ign	...
	Angle of Bend	deg	ign	...
	Number of Identical Pipes		def (=1)	...
	Model Gravity or Pipe Motion		<input type="checkbox"/>	
	Animate Results in 3D		<input type="checkbox"/>	

Obr. č. 5.9 Nastavení parametrů runneru [vlastní]

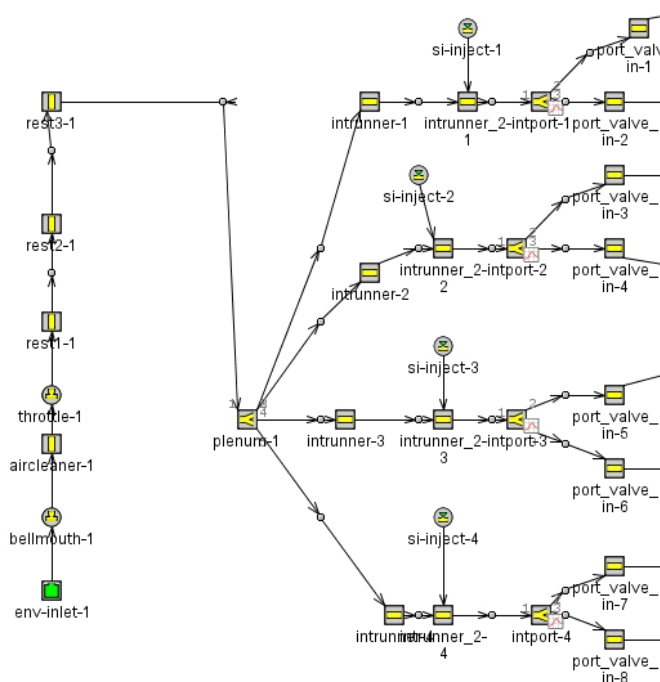
## Sací kanálky

I když jsou součástí bloku motoru, zařazuji je ještě do této sací části vzhledem k tomu, že jejich funkcí je plnění válce motoru pracovní látkou. Geometrie těchto kanálků je poměrně složitá a je komplikované ji nahrazovat jakoukoliv jinou geometrií. Z tohoto důvodu jsem kanály rozdělil na dvě části. Jednu tvoří dvě trubky vedoucí do válce a druhou objem zbylé části. Jako šablony proto slouží FlowSplitGeneral i PipeRound.



Obr. č. 5.10 Struktura sacího kanálu v modelu [vlastní]

Po dokončení specifikace veškerých prvků je možné tyto prvky sestavit a propojit do finální podoby sacího systému.



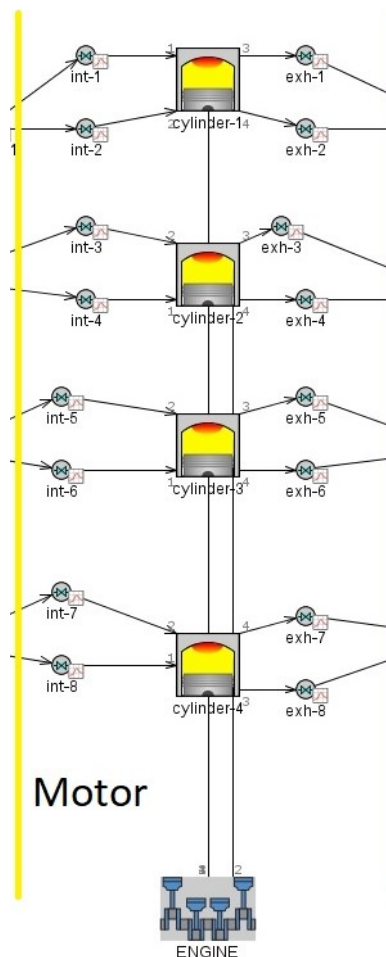
## Sací část

Obr. č. 5.11 Finální podoba sací části v modelu [vlastní]



### 5.3.2 Spalovací motor

Do této části spadá geometrie válce, klikového a vačkového hřídele, ventilů. Nastavení dalších provozních parametrů, které souvisí s danou koncepcí a funkcí motoru.



Obr. č. 5.12 Podoba motorové části v modelu [vlastní]

#### Sací a výfukové ventily

Ventily jsou charakterizovány svým průměrem, ventilovou vůlí a průběhem zdvihu, který souvisí s geometrií vačkového hřídele. Dalším parametrem, který zde vstupuje, je průtokový koeficient, který vyjadřuje průtokové ztráty kanálků a ventilu. [1]

✓ Timing

✓ Lift

✓ Flow Coefficients

✓ Output

Plots

	Attribute	Unit	Object Value
	Cam Timing Angle	Crank An... ▾	464
	Cam Timing Anchor Reference		TDCFiring ▾
	Cam Timing Lift Array Reference		Theta=0 ▾
	Source of Angle		
<input checked="" type="radio"/>	Attached Cylinder		
<input type="radio"/>	Part on Map		
<input type="radio"/>	Driver Reference Object		

✓ Timing

✓ Lift

✓ Flow Coefficients

✓ Output

Plots

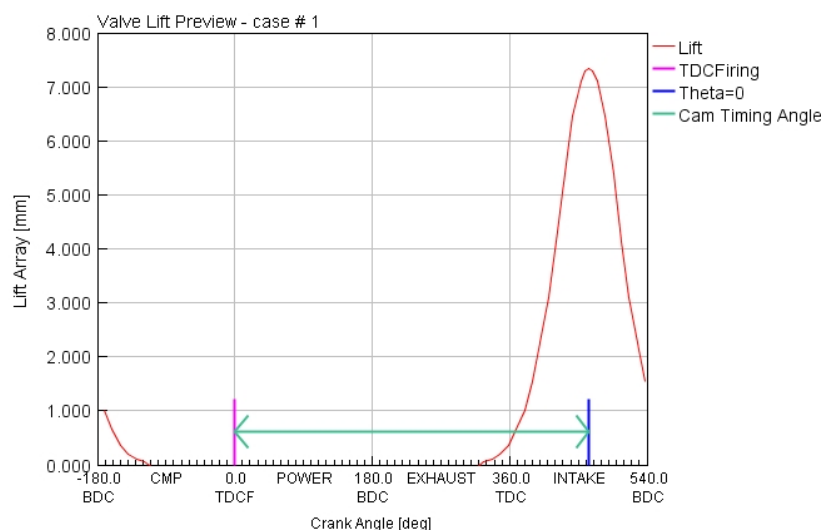
Attribute	Unit	Object Value
Valve Lash	mm ▾	0.15
Variable Profile Dependency Object		ign
Dwell at Maximum Lift	Cam Angle ▾	ign
Angle Multiplier		1
Anchor for Angle Multiplier		Theta=0

Obr. č. 5.13 Nastavení časování a geometrie ventilů [vlastní]

Průběhy zdvihů ventilů jsou důležité pro časování ventilů tak, aby motor správně fungoval. Je tedy důležité znát zdvihy ventilu vzhledem k vačkové hřídeli a úhlu jejího natočení a vztah mezi natočením vačkového a klikového hřídele. [3]

Toto časování můžu vztahovat k několika údajům. V mém modelu jsem vycházel z údaje o zažehnutí jiskry u vrchní úvratě (TDCF), ke které je vztažen rozestup od této hodnoty natočení vačkového hřídele k maximálnímu zdvihu ventilů. Tento rozestup je znázorněn v grafu níže.

Postup získávání dat o zdvihu ventilů vůči natočení vačky je popsán výše.

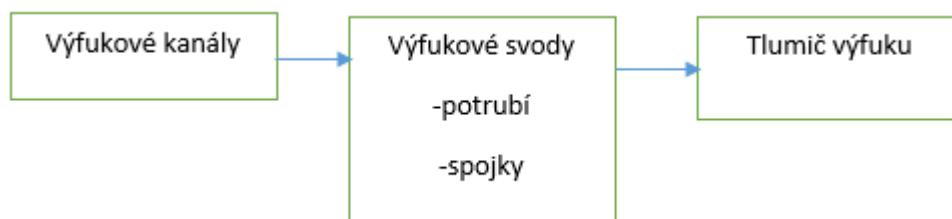


Obr. č. 5.14 Průběh a časování zdvihu ventilů [vlastní]



### 5.3.3 Výfukový systém



Do této části spadají výfukové kanály v hlavě motoru, samotné výfukové svody, jejichž geometrie má významný vliv na provozní charakteristiky spalovacího motoru a tlumič výfuku. Všechny tyto části budou dále podrobněji popsány.



Obr. č. 5.17 Schéma výfukového systému [vlastní]

#### Výfukové kanály

Platí pro ně obdobné pravidla jako pro ty sací. Vychází skrze ně produkty hoření, tedy výfukové plyny, které dále pokračují do výfukového potrubí. Důležitým parametrem je geometrie těchto kanálů, jelikož ta má značný vliv na průtokové parametry pracovní látky. Jelikož se jedná o poměrně složitou geometrii, je v modlu nahrazena objemem.

<input checked="" type="checkbox"/> Main	<input checked="" type="checkbox"/> Thermal	<input checked="" type="checkbox"/> Pressure Drop	<input checked="" type="checkbox"/> Boundary Data	 Plots	 3D Flow Split
	Attribute	Unit	Object Value		
Basic Geometry and Initial Conditions					
Volume		mm^3	31033		
Surface Area		mm^2	def		
Initial State Name			initial_exh		
Surface Finish					
<input type="radio"/> Smooth					
<input checked="" type="radio"/> Roughness from Material			cast_iron		
<input type="radio"/> Sand Roughness	mm				
Options					
Number of Identical Flowsplits			def (=1)		
<input type="checkbox"/> Gravity or Body Force Acceleration (See Help)	m/s^2				
Animate Results in 3D			<input type="checkbox"/>		

Obr. č. 5.18 Geometrie výfukového kanálu [vlastní]

Možnosti, jakými získat průtokové parametry, jsou dvě. A to pomocí simulace proudění, případně reálnou zkouškou. V tomto případě jsem použil variantu s reálnou zkouškou, která je předpokladem k dosažení co nejreálnějšího výsledku. Toto měření je popsáno v předešlé kapitole „Získávání geometrických parametrů“.

## Výfukové potrubí

Jedná se o soustavu ocelových trubek a spojek, které jsou dohromady spojeny pomocí svarů, kolen a podobně. Jelikož se v tomto případě jedná o čtyřválcový motor, vystupuje z každého válce jedna trubka, které se postupně spojují. Délka těchto trubek musí být stejná, aby měl každý válec stejné podmínky. Tomu je tedy uzpůsobena i geometrie potrubí. Cílem je snížení hluku a omezení ztrát v tomto potrubí. [1]

Tyto trubky se poté spojí po dvojicích. Jelikož vzroste objem pracovní látky, je nutné taktéž zvětšit průřez trubky, která z daného spojení vychází. Tímto spojením vzniknou již pouze dvě trubky, které jsou dále spojeny v jednu. Na koncovou trubku navazuje tlumič výfuku, který plní funkci tlumení hluku, vzhledem k pravidlům soutěže Formula student, jak bylo popsáno dříve.



*Obr. č. 5.19 Podoba výfukových svodů [vlastní]*

Dále bude popsáno nastavení geometrie potrubí a spojek. Jelikož je tato sestava relativně rozsáhlá, uvedu vždy postup na jednom příkladu. Tento postup byl obdobný u dalších komponent.

### Potrubí

Zde jsem opět použil šablonu PipeRound, ve které jsem charakterizoval průměr a délku daného úseku potrubí. Tento postup je obdobný jako u sacího systému a je zopakován i u dalších částí výfukového systému.

<input checked="" type="checkbox"/> Main <input checked="" type="checkbox"/> Thermal <input checked="" type="checkbox"/> Pressure Drop <input checked="" type="checkbox"/> Plots			
Attribute	Unit	Object Value	
<b>Basic Geometry and Initial Conditions</b>			
Diameter at Inlet End	mm	34	
Diameter at Outlet End	mm	40	
Length	mm	484	
Discretization Length	mm	36	
Initial State Name		initial	
<b>Surface Finish</b>			
<input type="radio"/> Smooth			
<input checked="" type="radio"/> Roughness from Material		steel	
<input type="radio"/> Sand Roughness	mm		
<b>Options</b>			
Radius of Bend	mm	def	
Angle of Bend	deg	80	
Number of Identical Pipes		def (=1)	

Obr. č. 5.20 Vzor nastavení geometrie potrubí výfukových svodů [vlastní]

## Spojka

Její funkcí je spojit 2 trubky do jedné. Je tak důležité definovat okrajové podmínky tohoto spojení (příloha C) a objem, který tato spojka vytváří. Pro tento účel jsem použil šablonu FlowSplitGeneral.

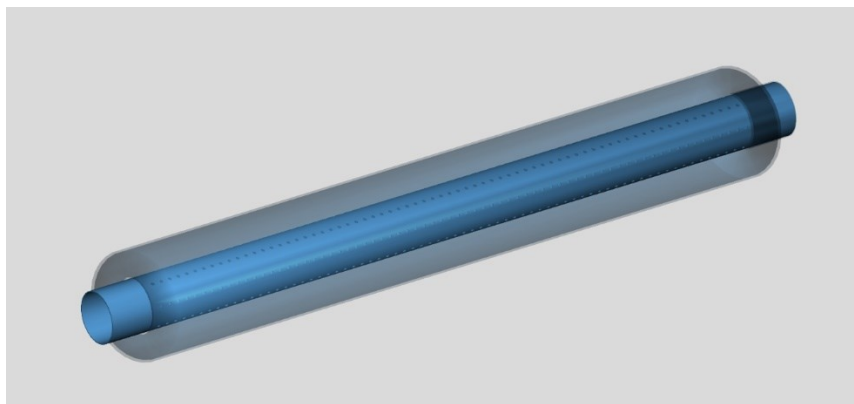
<input checked="" type="checkbox"/> Main <input checked="" type="checkbox"/> Thermal <input checked="" type="checkbox"/> Pressure Drop <input checked="" type="checkbox"/> Boundary Data <input checked="" type="checkbox"/> Plots <input checked="" type="checkbox"/> 3D Flow Split			
Attribute	Unit	Object Value	
<b>Basic Geometry and Initial Conditions</b>			
Volume	mm <sup>3</sup>	304500 ...	
Surface Area	mm <sup>2</sup>	def ...	
Initial State Name		initial ...	
<b>Surface Finish</b>			
<input type="radio"/> Smooth			
<input checked="" type="radio"/> Roughness from Material		steel	
<input type="radio"/> Sand Roughness	mm		
<b>Options</b>			
Number of Identical Flowsplits		def (=1) ...	
<input type="checkbox"/> Gravity or Body Force Acceleration (See Help)	m/s <sup>2</sup>		
Animate Results in 3D		<input type="checkbox"/>	

Obr. č. 5.21 Nastavení geometrie spojení dvou trubek svodů [vlastní]

## Tlumič výfuku

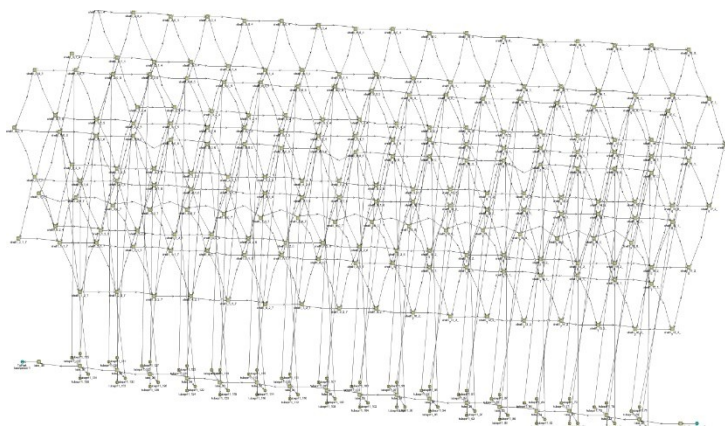
Jak již bylo popsáno, slouží především ke snižování hluchnosti. Nyní se zaměřím na jeho konstrukci. Tu tvoří záslepky na koncích, které slouží na jedné straně k napojení na výfukové svody a na druhé jako vývod spalín mimo vozidlo. Vevnitř se nachází perforovaná trubka, která tyto záslepky propojuje. Celá tato konstrukce má obal, který má průřez elipsy a je vyroben z carbonového kompozitu.

Z pohledu vkládání těchto dat je nejobtížnější nadefinovat perforovanou trubku, jelikož má víc než 3000 otvorů. Jako pomoc pro tuto aplikaci poslouží nástroj GEM 3D, který obsahuje program GT ISE a umožňuje převádět 3D data rovnou do modelu.



*Obr. č. 5.22 3D model tlumiče výfuku [vlastní]*

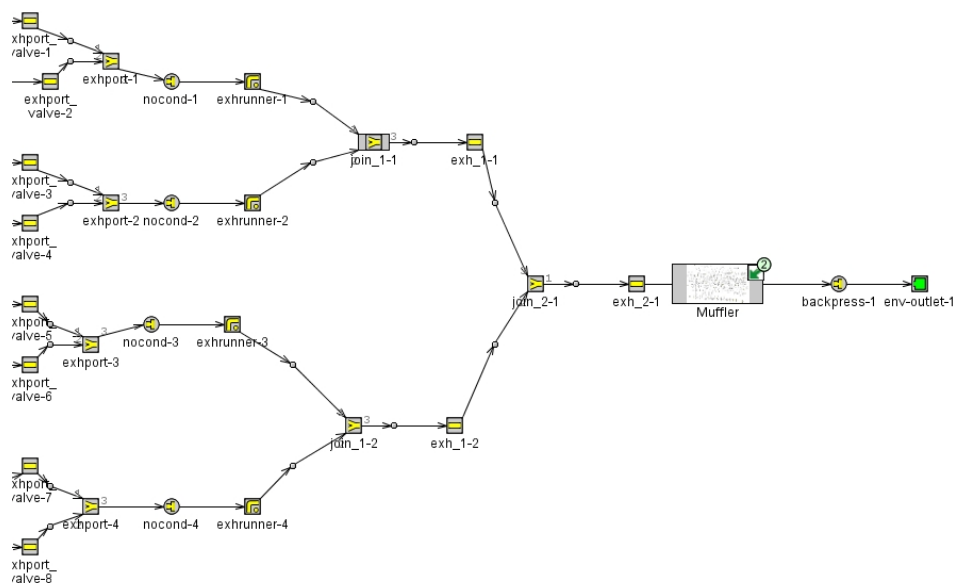
V první řadě je důležité součást správně vymodelovat jako 3D prvek a poté ji převést do dat 1D modelu. Po dokončení 3D modelu lze pomocí funkce v GEM 3D „export“ tato data převést rovnou do prostředí GT SUITE.



*Obr. č. 5.23 Podoba tlumiče výfuku po exportu do GT-SUITE [vlastní]*

Jak je patrné z obr. č. 5.23 síť samotné koncovky je složitější než celého motoru. Volba tedy tohoto postupu se ukázala jako správná a ušetřila mnoho času při stavbě modelu.

Obdobně, jako u sacího systému, jsem po dokončení nastavení jednotlivých částí výfukového systému tyto části sestavil do pořadí, jaké odpovídá reálnému výfukovému systému a vzájemně je propojil vazbami, aby vytvořily jeden celek.



## Výfuková část

Obr. č. 5.24 Podoba výfukového systému v modelu [vlastní]

### 5.4 Nastavení okrajových podmínek

#### Okolní prostředí

Na vstupu a výstupu z modelu se nachází šablony, které nám určí podmínky pro okolní prostředí. Tyto podmínky jsou dány parametry tlaku, jenž nabývá hodnoty atmosférického tlaku, a teploty vzduchu. V případě nastavení výstupní šablony je nutné přepnout v nastavení „Složení zpětného proudu“ na hodnotu „track“, jenž zaručí, že teplota proudu, který se vrací zpět do výfukového potrubí, je ovlivněna teplotou výfukových spalin, která je rovna teplotě z posledního časového rozmezí. Pro tento účel slouží šablona „EndEnviroment“.



☒ Main
 ☒ Options
 ☒ Altitude and Humidity
 ☒ Plots

Attribute	Unit	Object Value
Pressure (Absolute)	bar	1 ...
Temperature	K	300 ...
Composition		air ...

Obr. č. 5.25 Nastavení vstupních podmínek do modelu [vlastní]

## Nastavení počáteční podmínky výpočtu

Pro každý prvek je nutné definovat počáteční stav, ze kterého vychází software při výpočtu. Jedná se o nastavení druhu pracovní látky, její teploty a tlaku. K tomuto účelu slouží šablona „FluidInitialState“. Její hodnota se zadává do pole „Initial State Name“.

## Teplota stěny:

Jedná se o hodnotu, která se nastavuje pro každou část potrubí zvlášť. Jelikož nejsou známe hodnoty pro konkrétní motor, který je předmětem řešení této práce, vycházel jsem z hodnot, které slouží jako příklad v průvodci programem. Pro zvýšení přesnosti modelu je každopádně vhodné tyto hodnoty do budoucna zajistit.

☒ Main
 ☒ Thermal
 ☒ Pressure Drop
 ☒ Plots

Attribute	Unit	Object Value
<b>Wall Temperature Method</b>		
<input checked="" type="radio"/> Imposed Wall Temperature	K	320 ...
<input type="radio"/> Calculated Wall Temperature		
<input type="radio"/> Wall Temperature from Connected Thermal Primitive		
<input type="radio"/> Adiabatic		
<b>Additional Thermal Options</b>		
Heat Transfer Multiplier		def (=1) ...
Heat Input Rate	W	ign ...
Thermocouple Object		ign ...
<input checked="" type="radio"/> Heat Transfer Correlation		Colburn
<input type="radio"/> User Defined Heat Transfer Model		
<input type="radio"/> Heat Transfer Coefficient	W/(m <sup>2</sup> ·K)	
Condense/Evaporate Water Vapor (Non-Refrigerant Circuits)		off

Obr. č. 5.26 Nastavení teplotních podmínek simulace [vlastní]

## Nastavení materiálu

Odpovídá materiálu, ze kterého je daná součást vyrobena. Lze vybírat z knihovny, která je již v programu obsažena.

## Násobitel přestupu tepla

Jedná se opět o parametr, který slouží k upřesnění simulace. Jelikož nejsou známý jeho hodnoty pro daný příklad, použil jsem výchozí hodnotu, která je v modelu nastavena. Ta odpovídá hodnotě 1.

## Válec

Válec jako takový je charakterizován výpočetními modely teploty stěny válce, modelem přestupu tepla a modelem spalování. Detailní nastavení těchto modelů naleznete v příloze.

## 5.5 Spuštění simulace

V momentě, kdy mám sestaven model a nastaveny jeho okrajové podmínky mohu přistoupit k nastavení samotného průběhu simulace a jejího spuštění.

Jako první si stanovím, za jakých podmínek a s jakými parametry má simulace počítat. Jedná se především o určení otáček motoru, ve kterých bude simulace prováděna. Stanovím tedy rychlost motoru hodnotou RPM (rotations per minute).

Parameter	Unit	Description	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
Case On/Off		Check Box to Turn Case On	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Case Label		Unique Text for Plot Legends	Speed=12000	Speed=11500	Speed=11000	Speed=10500	Speed=10000	Speed=9500
rpm	RPM	Engine Speed	12000...	11500...	11000...	10500...	10000...	9500...
backp (Optimizer)	mm		40...	40...	40...	40...	40...	40...
throttle	mm		29...	29...	29...	29...	29...	29...
WallTemp	K		900...	900...	900...	900...	900...	900...

Obr. č. 5.27 Nastavení bodů, ve kterých má být simulace provedena [vlastní]

Jako další provedu nastavení průběhu simulace. To znamená, s kolika cykly bude počítat, kdy má být ukončena a tak dále. Tyto parametry mají vliv především na výpočetní čas simulace. Je tak důležité nastavit hodnoty, které budou dostatečné pro výsledky simulace a zároveň tak, aby neprobíhala nepřiměřeně dlouho. Jako optimální se ukázalo nastavení na

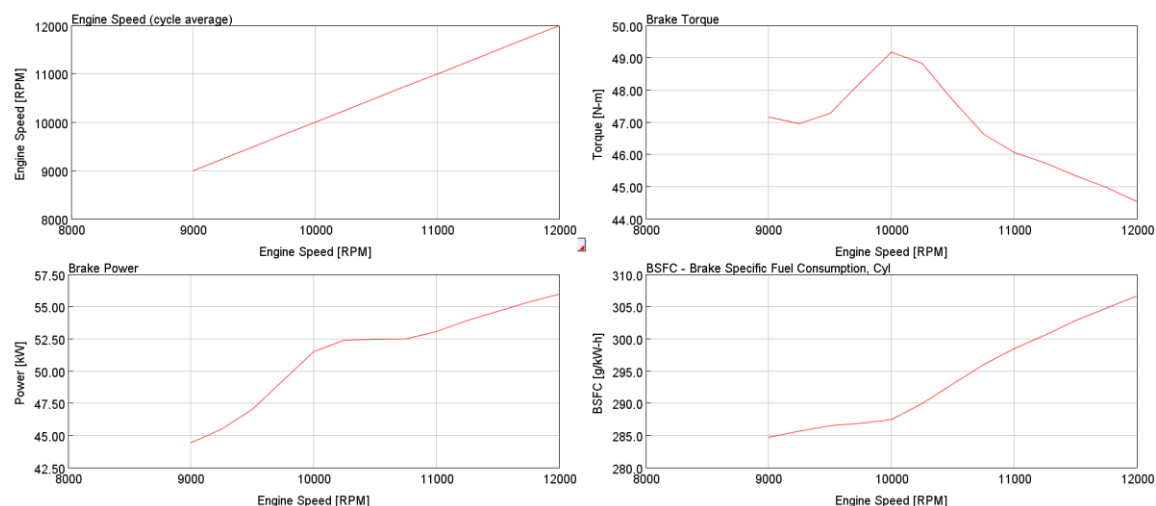
maximální počet cyklů 10. Také jsem zvolil ukončení daného výpočtu v momentě, kdy jsou již výsledky simulace ustálené.

<input checked="" type="checkbox"/> TimeControl <input checked="" type="checkbox"/> Initialization <input checked="" type="checkbox"/> FlowControl <input checked="" type="checkbox"/> ODEControl <input checked="" type="checkbox"/> SignalControl <input checked="" type="checkbox"/> Thermal			
	Attribute	Unit	Object Value
	Time Control Flag		periodic <input type="button" value="v"/>
<input checked="" type="radio"/>	Maximum Simulation Duration (Cycles)		10 <input type="button" value="..."/>
	Minimum Simulation Duration (Cycles)		ign <input type="button" value="..."/>
<input type="radio"/>	Maximum Simulation Duration (Time)	s <input type="button" value="v"/>	
	Minimum Simulation Duration (Time)	s <input type="button" value="v"/>	ign
	Automatic Shut-Off When Steady-State		on <input type="button" value="v"/>
	Main Driver (Defines Periodic Frequency)		
<input checked="" type="radio"/>	Automatic		
<input type="radio"/>	Part Name		
<input type="radio"/>	Reference Object		
	Improved Solution Sequence for Multi-Circuit Models		<input type="checkbox"/>

Obr. č. 5.28 Nastavení časových podmínek simulace [vlastní]

## 5.6 Výsledky simulace

Po spuštění a proběhnutí samotné simulace mohu v nástroji GT-POST pracovat s výsledky, které byly v průběhu simulace vypočítány. S těmito výsledky lze pracovat v několika podobách, od tabulkových údajů až po grafické zpracování. Jelikož se v případě výkonových parametrů SM nejčastěji používá grafický otáčkových charakteristik, budu se zde zabývat jejich grafickou podobou, pomocí které budu nadále provádět taktéž validaci modelu. Simulací lze zjistit nespočet údajů o spalovacím motoru, od výkonových parametrů, přes hodnoty středního efektivního tlaku, po údaje o spotřebě paliva a podobně.



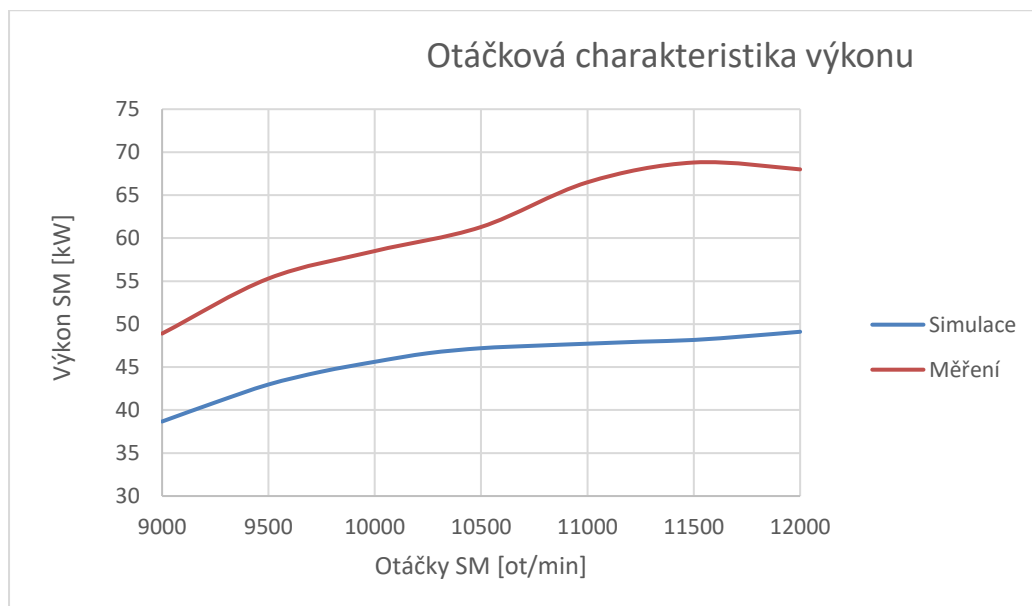
*Obr. č. 5.29 Příklad vykreslení výsledků simulace [vlastní]*

Výsledek samotné simulace odpovídá rozsahu otáček a kroku mezi otáčkami, který jsem nastavil před spuštěním simulace, následně jsou tyto body propojeny a vytvoří křivku. Je nutné stanovit takový počet kroků, aby plynulost grafu byla dostatečná, ale aby se příliš neprodělovala doba simulace.

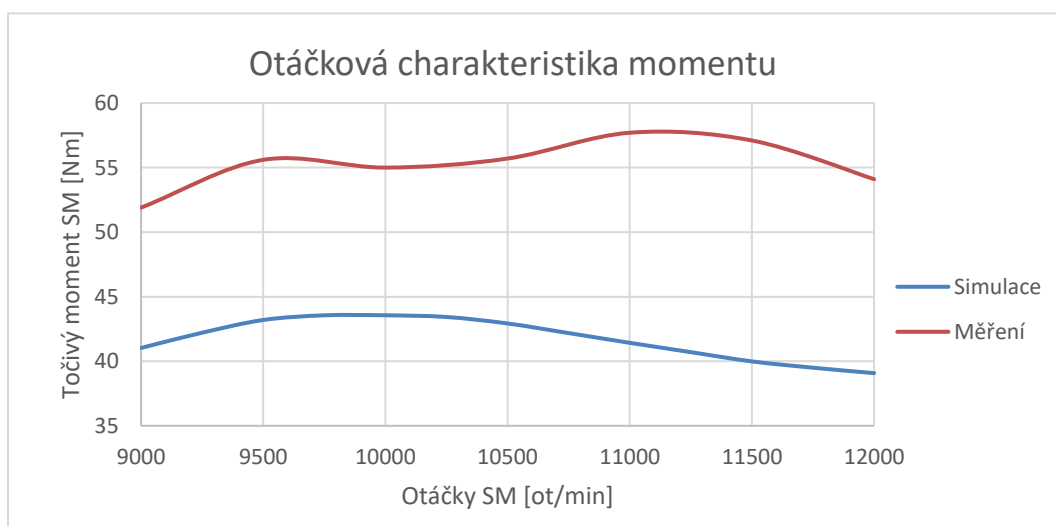
## 5.7 Validace a kalibrace modelu

Základními údaji o spalovacím motoru je průběh točivého momentu a jeho výkonu. Jedná se o vhodný způsob, jak vyhodnotit přesnost simulace, jelikož lze tato data poměrně jednoduše získat z reálného vozidla na válcové zkušebně, případně měření na motorové brzdě.

Vzhledem k tomu, že data z válcové zkušebny k danému spalovacímu motoru jsou k dispozici, rozhodl jsem se je při validaci využít. Jedná se o starší data bez některých úprav, které jsou na motoru provedeny (nový tlumič výfuku), protože měření s danými úpravami zatím neproběhlo. Nejedná se však o výrazné změny, proto lze prozatím brát tato data pro vyhodnocení jako směrodatná. Otáčky v grafech se pohybují v rozmezí 9 000 – 12 000 ot/min. Jedná se o nejvyužívanější pásmo otáček v průběhu jízdy vozidla, jelikož je zde maximum točivého momentu a výkonu. Vrchní mez je daná maximálními otáčkami, kterých je schopen motor dosáhnout.



Obr. č. 5.30 Porovnání průběhů výkonu dat naměřených a simulovaných [vlastní]



Obr. č. 5.31 Porovnání průběhů točivého momentu dat naměřených a simulovaných [vlastní]

V grafech na obr. č. 30 a 31 je znázorněno porovnání průběhů výkonů a točivých momentů. Jak je patrné již na první pohled, odchylky jsou poměrně výrazné. Tyto odchylky jsou způsobeny zobecněním některých veličin v simulačním modelu, jako jsou hodnoty přestupu tepla, průtokové koeficienty a další. Pro zvýšení přesnosti modelu jsem se rozhodnul pro fyzické měření průtokových koeficientů pracovní látky skrze kanály a ventily v hlavě spalovacího motorů, které hrají ve výsledku velkou roli.

### 5.7.1 Měření průtokových koeficientů

Tato měření jsem provedl na testovacím zařízení vlastní konstrukce. Jedná se o testovací zařízení, které vyvolává ve svých útrokách podtlak nebo přetlak, v závislosti na tom, pro jaký směr proudění skrze hlavu motoru měření provádím (příloha D).

Zařízení je založeno na principu měření veličin statického a dynamického tlaku při průtoku přes kontrolní průřez, který je přesně kalibrován testovací clonou. Pomocí tlakových údajů a kontrolního průřezu je schopen vyhodnotit jak rychlost proudění, tak na jejím základě objemový průtok za časovou jednotku. K přepočtu objemového průtoku na průtokové koeficienty jsem použil výpočet, který bude dále popsán.



*Obr. č. 5.32 Umístění kalibrační clony v zařízení [vlastní]*

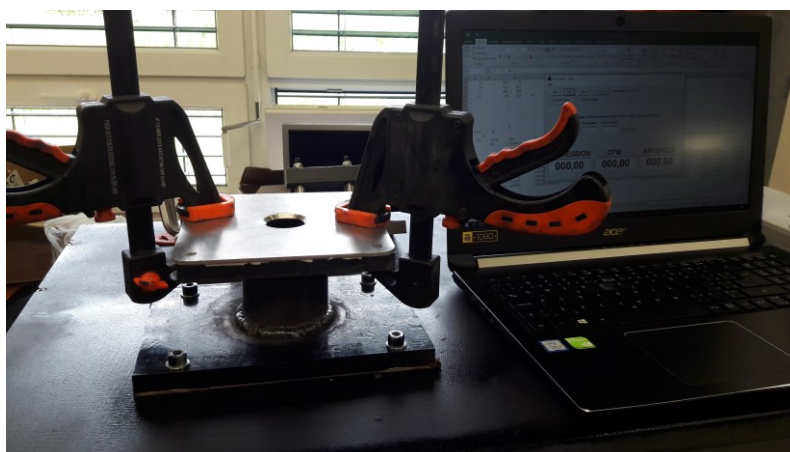
V první řadě bylo potřebné zařízení dostatečně kalibrovat tak, aby byly naměřené hodnoty reprezentativní a použitelné pro simulaci. Kalibrace probíhá pomocí testovacích clon, které mají otvor o přesně stanoveném průřezu. Postup je takový, že clona s největším průřezem je vložena do zařízení a její průřez je stanoven jako kontrolní pro vyhodnocení průtoků řídicí jednotkou. Další clony jsou poté postupně upevněny na horní část zařízení.

Na cloně je uvedeno, jakého průtoku by mělo být dosaženo při daném tlaku. Jak je vidět na obrázku, tlak je vyhodnocován v jednotkách „palec vodního sloupce“. Průtok je zobrazen v jednotkách CFM, což znamená „Cubic feet per minute“.



*Obr. č. 5.33 Kalibrační údaje na cloně [vlastní]*

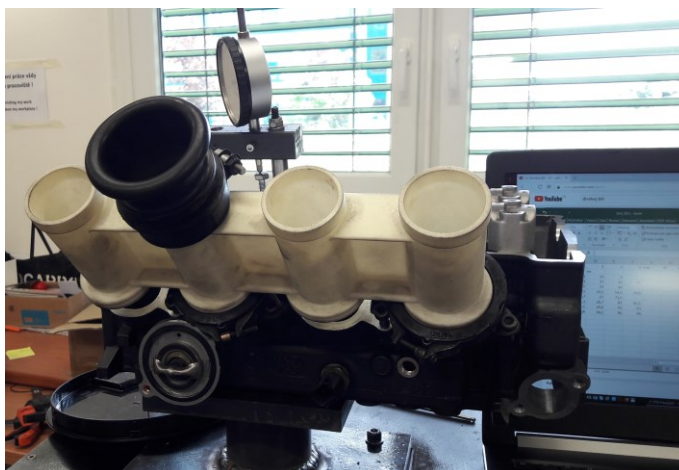
Hodnota 28'' je určena pro kalibraci při umístění clony na zařízení a 16'' v zařízení. Na obrázku č. 5.33 je vidět kalibrace pomocí clony na zařízení. Jedná se o stejnou clonu jako na obrázku výše, kalibrace byla tedy prováděna na hodnotu 100 CFM. Po dokončení kalibrace jsem mohl začít s měřením objemových průtoků.



*Obr. č. 5.34 Umístění kalibrační clony na zařízení [vlastní]*

#### Měření objemových průtoků:

Nyní, když mám zařízení dostatečně kalibrované, jsem zahájil samotné měření. To je složeno ze 4 odlišných typů měření. A to měření výfukových a sacích ventilů, které testují v obou směrech proudění. Měření jsem prováděl pro postupnou změnu zdvihu ventilů, a to od 1 mm zdvihu, kdy do této hodnoty se berou průtokové hodnoty jako zanedbatelné. Aby nebylo měření ovlivněno například ostrou hranou na vstupu do sacího kanálu, měření jsem prováděl i s částí airboxu. Proto jsem poté zahrnul tento koeficient i pro napojovací potrubí airboxu.



*Obr. č. 5.35 Uchycení hlavy motoru na zařízení včetně příslušenství [vlastní]*

Pro výpočet průtokových koeficientů je nutné znát teoretické množství vzduchu, které může protéct a skutečné množství, které kanály v daný moment protéká. Údajem, který je pro mne důležitý, je vliv tvaru kanálů a ventilů na proudění tekutiny.

$$c_d = \frac{Q_{skut}}{Q_{teor}} \quad (5.1)$$

Ke zjištění teoretického množství vzduchu jsem změřil průtok zařízením bez hlavy spalovacího motoru pro tlak 4000 Pa. Toto měření jsem provedl jak pro sací mód, tak pro výfukový. Poté jsem mohl začít s měřením samotných průtoků hlavou spalovacího motoru. Tyto hodnoty můžete vidět v tabulce č. 5.3.

Abych eliminoval chyby v průběhu měření, opakoval jsem každé měření čtyřikrát a nezávisle na sobě, abych snížil pravděpodobnost opakování chyby z předešlého měření.



Tab. č. 5.2 Naměřené hodnoty objemových průtoků [vlastní]

Zdvih ventilů [mm]	Sací ventily		Výfukové ventily	
	Dopředné [CFM]	Zpětné [CFM]	Dopředné [CFM]	Zpětné [CFM]
1	12	6	10	3
2	30	26	30,5	30
3	53,7	52	44,5	42
4	74,5	73,5	55,5	53
5	95,5	89,5	64	60
6	112	108	71	64,5
7	125	122	72,5	67,7
7,5	130	128	73	70

Z naměřených hodnot jsem vypočítal průměrné hodnoty. V případě, kdy výsledek jedné zkoušky se výrazně odchýlil, jsem tento výsledek vyloučil. Pro tyto průměrné hodnoty jsem dále provedl přepočet na průtokové koeficienty.

Tento výpočet závisí na průměru trubky na přípravku, která sloužila jako referenční při měření teoretického průtoku, který při tlaku 4000 Pa zařízením prochází.

$$S_{\text{přípravek}} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 62,5^2}{4} = 3036 \text{ mm}^2 \quad (5.2)$$

$S_{\text{přípravek}}$ ...plocha průřezu přípravku [mm<sup>2</sup>]

d...průměr přípravku [mm]

Dále jsem vypočítal podíl mezi teoretickou hodnotou průtoku a naměřenou hodnotou, která je vztažena k průřezu válce na přípravku, ze kterého se počítal teoretický průtok. Tato hodnota je však vztažena k průřezu přípravku a pro můj účel bylo potřebné zjistit hodnotu vztaženou k průřezu ventilového sedla. V první řadě jsem však musel vypočítat tzv. hodnotu „efektivní plochy válce“.

(5.3)

$$S_{ef} = \frac{S_{přípravek} \cdot Q_{ref}}{Q_{ef}}$$

$S_{ef}$ ...efektivní plocha přípravku [mm<sup>2</sup>]

Nyní už jen potřebuji znát hodnotu plochy sedla ventilu a poté vypočítat průtokový koeficient. Jelikož jsou vždy 2 ventily na válec, je nutné uvažovat plochu jednoho ventilu dvakrát.

$$S_v = \frac{\pi \cdot d_v^2}{2} \quad (5.4)$$

$S_v$ ...plocha průřezu ventilového sedla [mm<sup>2</sup>]

$d_v$ ...průměr ventilového sedla [mm]

Tab. č. 5.3 Výpočet průtokových koeficientů [vlastní]

	Dopředné	Zpětné		Dopředné	Zpětné		Dopředné	Zpětné
Zdvih [mm]	$Q_{ref}/Q_{ef}$		$S_{ef}$ [mm <sup>3</sup> ]	$Q_{ref} \cdot S_{ef}/Q_{ef}$	$Q_{ref} \cdot S_{ef}/Q_{ef}$	$S_{ref}$ [mm <sup>3</sup> ]	$c_d$	
1	0,01	0,01	3066,41	24,34	21,90	760,27	0,03	0,03
2	0,08	0,07	3066,41	243,37	222,68	760,27	0,32	0,29
3	0,11	0,11	3066,41	340,71	324,89	760,27	0,45	0,43
4	0,14	0,13	3066,41	429,95	405,20	760,27	0,57	0,53
5	0,16	0,15	3066,41	486,73	467,26	760,27	0,64	0,61
6	0,17	0,17	3066,41	523,24	518,37	760,27	0,69	0,68
7	0,18	0,17	3066,41	549,19	529,32	760,27	0,72	0,70
7,5	0,19	0,17	3066,41	567,85	532,97	760,27	0,75	0,701

$$c_d = \frac{S_{ef}}{S_v} \quad (5.5)$$

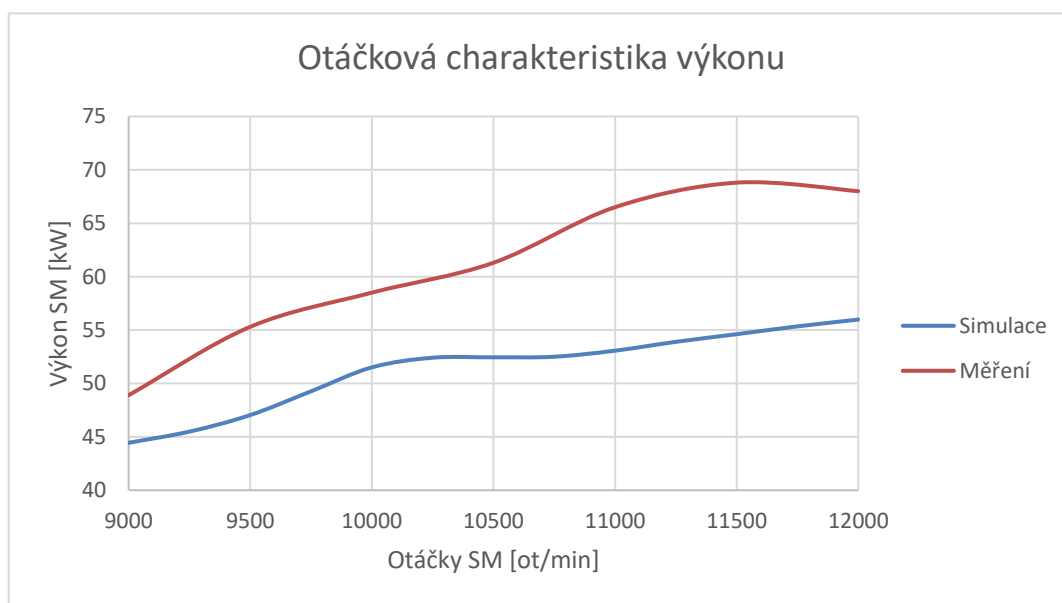
### 5.7.2 Výsledky s průtokovými koeficienty

Po vložení naměřených údajů jsem opět provedl simulaci, při které byla zjištěna následující data.

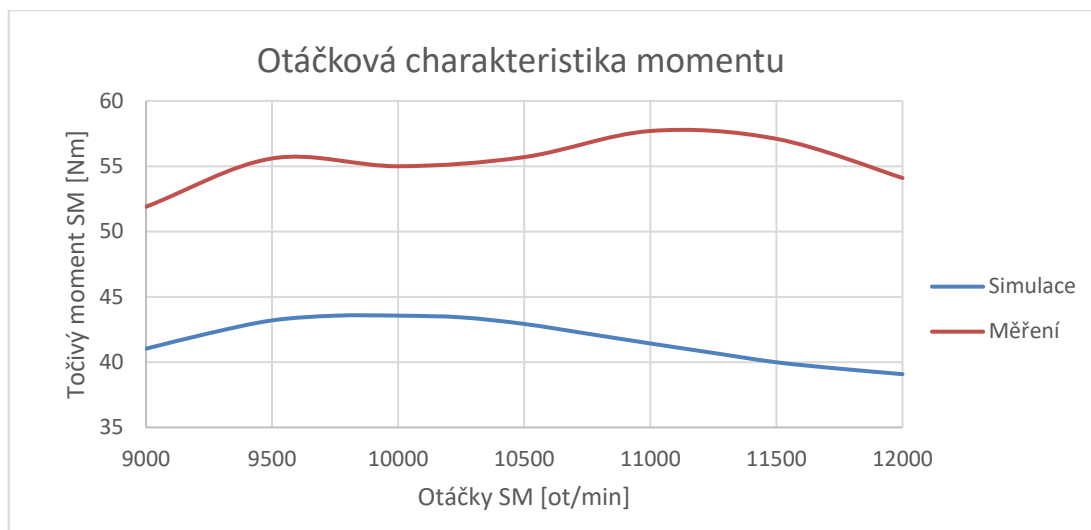
Tab. č. 5.4 Porovnání hodnot ze simulace a měření s naměřenými koeficienty [vlastní]

Před měřením	Výkon SM [kW]	Točivý moment SM [Nm]
<b>Průměrná odchylka</b>	15,41	13,70
<b>Maximální odchylka</b>	20,64	17,11
<b>Maximální hodnota model</b>	49	44
<b>Maximální hodnota zkušebna</b>	69	58
Po měření	Výkon SM [kW]	Točivý moment SM [Nm]
<b>Průměrná odchylka</b>	9,75	8,55
<b>Maximální odchylka</b>	14,19	11,75
<b>Maximální hodnota model</b>	56	49
<b>Maximální hodnota zkušebna</b>	69	58

Jak je patrné z tabulky č. 5.5, u obou sledovaných údajů došlo ke snížení jak průměrné odchylky, tak maximální odchylky. Tato odchylka reprezentuje absolutní hodnotu rozdílů reálných a simulovaných hodnot při daných otáčkách motoru. Tím bylo dosaženo předpokládaného přínosu. Dále je v grafickém porovnání zřejmé taktéž přiblížení simulačního průběhu k reálnému (obr. č. 5.36 a 5.37).



Obr. č. 5.36 Porovnání průběhů výkonu dat naměřených a simulovaných s průtokovými koeficienty [vlastní]



*Obr. č. 5.37 Porovnání průběhů točivého momentu dat naměřených a simulovaných s průtokovými koeficienty [vlastní]*

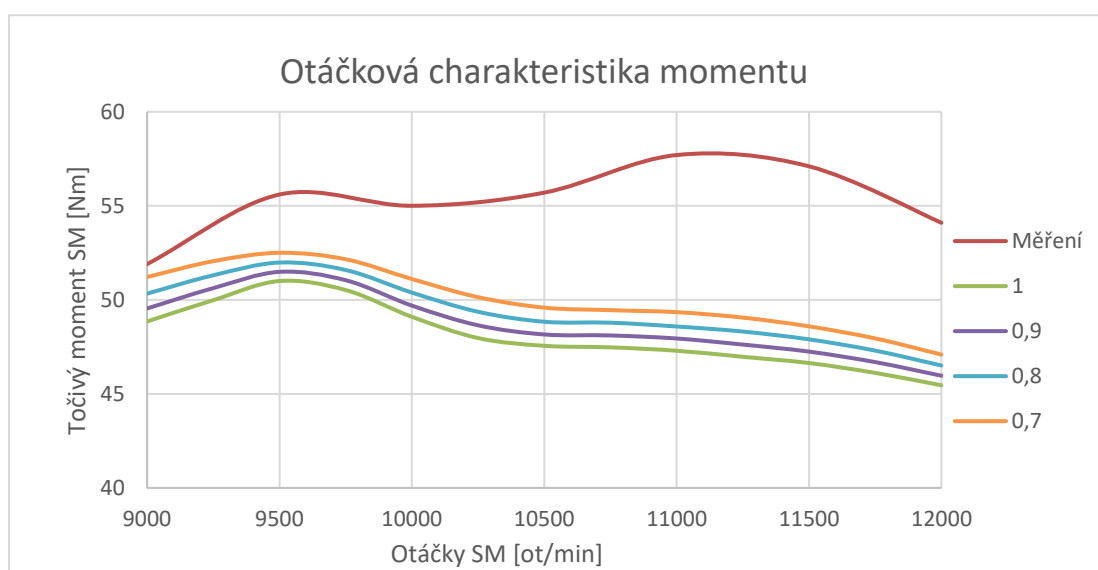
### 5.7.3 Kalibrace modelu

Ke kalibraci do značné míry pomohlo již změření průtokových koeficientů sacích a výfukových kanálů. Jak je patrné z výsledků i po této proceduře je odchylka modelu od měřených hodnot značná, a proto přistupuji k další kalibraci. Pro další kalibraci jsem zvolil citlivostní analýzu, jejíž aplikací mohu sledovat vliv změny dílčích parametrů na vývoj křivkových charakteristik.

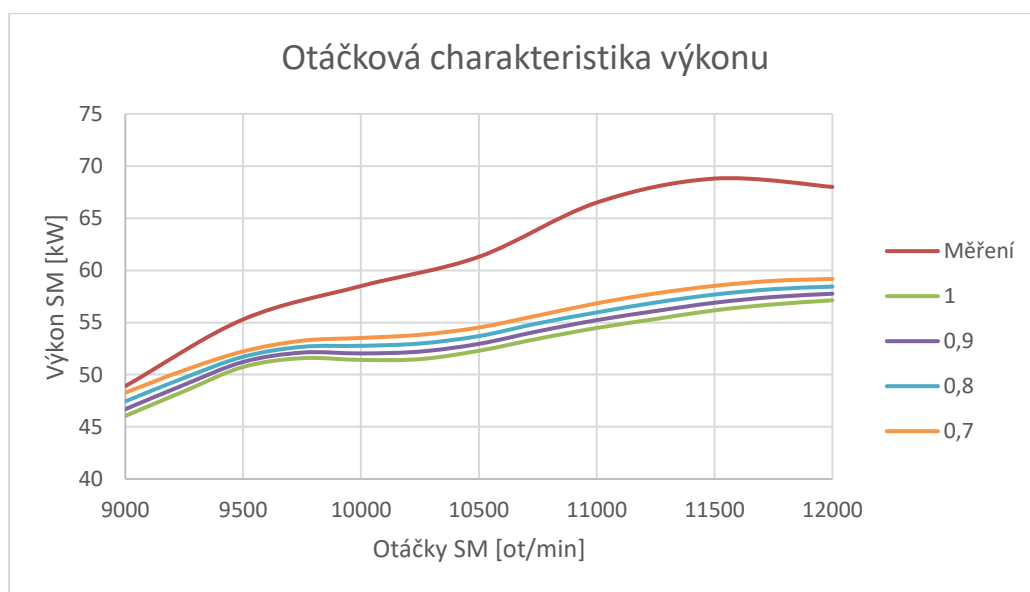
K citlivostní analýze jsem použil nastavení směšovacího poměru lambda, násobitele přestupu tepla a nastavení mechanické účinnosti pomocí třetího středního efektivního tlaku (FMEP).

## Násobitel přestupu tepla

Pro první kalibraci jsem se zaměřil na násobitel přestupu tepla, který vyjadřuje množství tepla, které je odvedeno jako ztrátové. V případě výchozího nastavení tato veličina odpovídá hodnotě 1. V běžných spalovacích motorech se pohybuje v rozmezí 0,7-1,2. Postupně jsem tuto hodnotu měnil a sledoval vývoj charakteristik. Ukázal se trend, který je logický, a to takový, že snižováním tohoto čísla došlo k posouvání celé křivky směrem nahoru k vyšším hodnotám (obr. č. 5.38 a 5.39) Po dosažení krajní hranice 0,7 jsem dosáhnul téměř shodné hodnoty na počátku simulace v 9000 ot/min. To znamenalo vhodnou výchozí pozici pro kalibraci dalších částí charakteristiky.



*Obr. č. 5.38 Citlivostní analýza násobitele přestupu tepla pro momentovou charakteristiku [vlastní]*



*Obr. č. 5.39 Citlivostní analýza násobitele přestupu tepla pro výkonovou charakteristiku [vlastní]*

### Směšovací poměr lambda

V případě původního modelu byla tato hodnota nastavena konstantně na hodnotu 12,5:1 pro celé spektrum otáček. S ohledem na nastavení palivové mapy konkrétního motoru jsem tuto hodnotu upravil tak, aby se směs pohybovala od prakticky stechiometrické (14,8:1) po bohatou směs ve vysokých otáčkách, kde je využíváno vyššího obsahu paliva k chlazení pracovního prostoru válce. Přehled konkrétních hodnot směšovacího poměru najdete v tabulce č. 5.5.

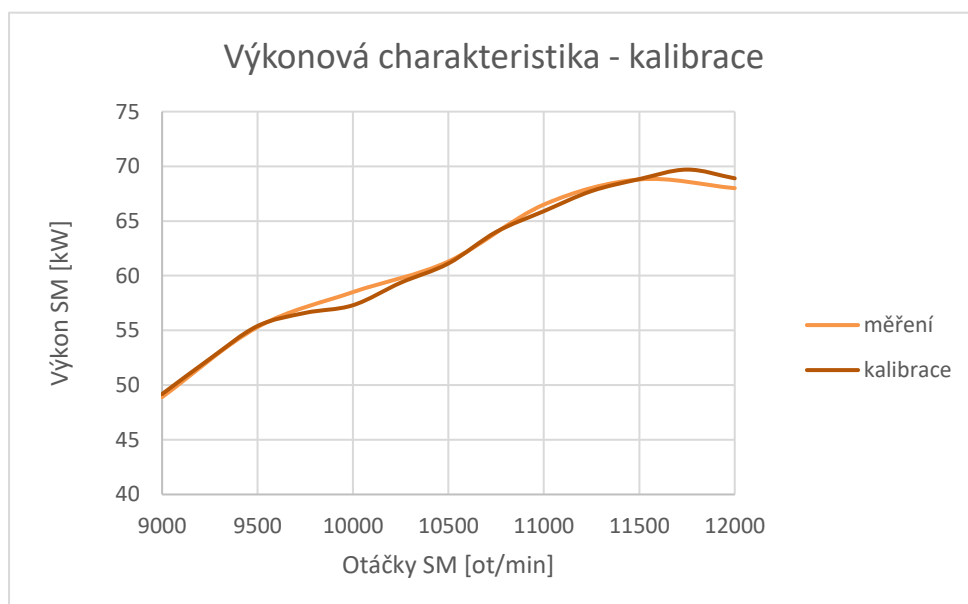
*Tab. č. 5.5 Vývoj směšovacího poměru [vlastní]*

ot. SM [ot/min]	lambda
9000	14
9250	13,9
9500	13,8
9750	13,7
10000	13,6
10250	13,5
10500	13,4
10750	13,3
11000	13,2
11250	13,1
11500	13
11750	12,9
12000	12,8

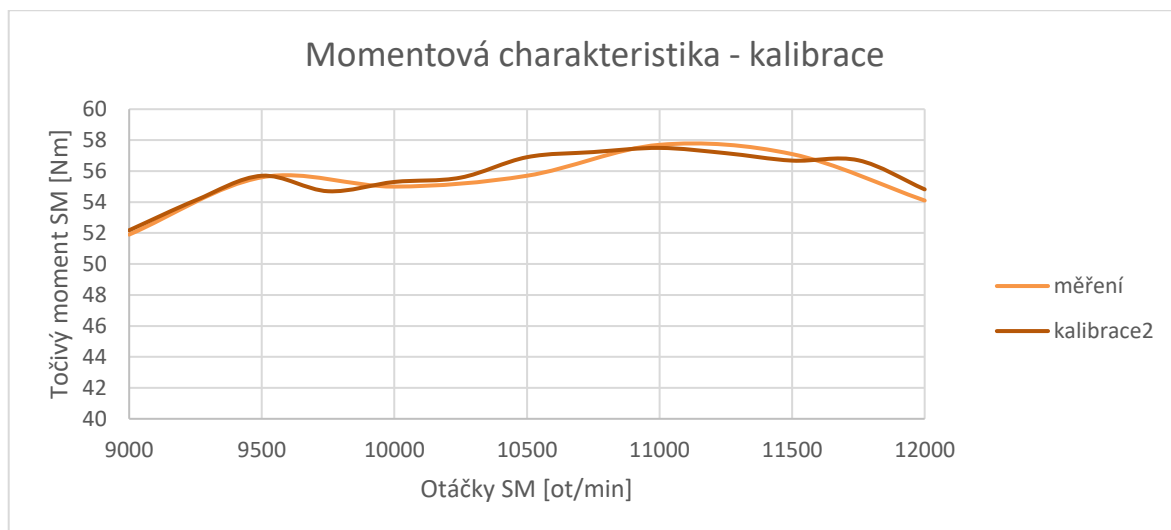
## Mechanická účinnost

Jelikož se jedná o parametr, pro jehož výpočet je nutné znát střední efektivní a střední indikovaný tlak, vycházel jsem z obecných předpokladů, které jsou o této hodnotě známy. Jedním je, že její hodnota se s otáčkami motoru zvyšuje téměř lineárně. Dále jsem použil příklad, jakých hodnot může přibližně nabývat. Mechanickou účinnost vyjadřuji v modelu pomocí hodnoty třetího středního efektivního tlaku (FMEP). Po vložení dat do modelu jsem dále tuto hodnotu v daných otáčkách korigoval tak, aby se konečná podoba charakteristik maximálně přiblížila charakteristikám, které pro validaci sloužily. Vývoj hodnoty FMEP naleznete v příloze E.

Po dokončení kalibrace jsem dospěl k výsledku, který je vidět v grafech na obr. č. 5.40 a 5.41.



*Obr. č. 5.39 Průběh výkonu po kalibraci [vlastní]*



Obr. č. 5.40 Průběh momentu po kalibraci [vlastní]

Jak je již na první pohled patrné, došlo k výraznému přiblížení k předloze, která je taktéž doložena čísly v tabulce č. 5.6, kde je vyjádřeno porovnání průměrných odchylek simulovaného průběhu před kalibrací a po ní. Ta je složena z absolutních hodnot rozdílů při daných otáčkách SM. Dále je v tabulce uvedena hodnota maximální odchylky v průbězích a také hodnota maximální hodnoty dané veličiny.

Tab. č. 5.6 Porovnání hodnot ze simulace a měření na zkušebně před a po kalibraci [vlastní]

Před kalibrací	Výkon SM [kW]	Točivý moment SM [Nm]
<b>Průměrná odchylka</b>	9,75	8,55
<b>Maximální odchylka</b>	14,19	11,75
<b>Maximální hodnota model</b>	56	49
<b>Maximální hodnota zkušebna</b>	69	58
Po kalibraci	Výkon SM [kW]	Točivý moment SM [Nm]
<b>Průměrná odchylka</b>	0,47	0,46
<b>Maximální odchylka</b>	1,20	1,20
<b>Maximální hodnota model</b>	70	58
<b>Maximální hodnota zkušebna</b>	69	58

U výsledků po kalibraci je zřejmé zlepšení u všech sledovaných hodnot na přijatelnou úroveň. Model tak mohu uvažovat jako kalibrovaný na dostatečnou úroveň pro jeho následné využití.



## 6 Zhodnocení a doporučení

Co se závěrečného zhodnocení týká, tak cíl práce, sestavit model motoru a provést validaci, se povedlo naplnit.

Během kalibrace modelu jsem však vycházel především z obecně známých údajů, nikoliv z dat, která by odpovídala tomuto motoru. Proto tyto údaje nabízejí další příležitost pro budoucí práci k jejich zjištění.

Údaje o průtokových koeficientech byly změřeny, ale jejich přesnost by bylo vhodné doplnit například porovnáním se simulací samotného proudění vzduchu přes kanál a ventil v různých polohách vysunutí ventilu. Taktéž je potřebné se ještě zaměřit na práci se samotným měřicím zařízením a zamezit nepřesnostem, které vstupují do výsledků. Tyto nepřesnosti jsou způsobeny především úniky vzduchu, které měření doprovázejí. Pro další kalibraci je tedy nutné kalibrovat měřicí zařízení a jeho měřicí jednotku.

Jako další krok je plánovaná zkouška samotného motoru na motorové brzdě se všemi současnými úpravami, po které budou provozní údaje aktuální a bude opět možné se přiblížit co nejvěrohodněji těmto datům.

Model motoru jako celek může nadále sloužit k rozsáhlému výzkumu a vývoji nových komponent v podobě práce členů týmu Formula TU Ostrava nebo jako téma bakalářských, či diplomových prací. Je také vhodnou učební pomůckou pro pochopení principů fungování spalovacího motoru a vlivu jednotlivých parametrů v souvislostech.

## 7 Závěr

Cílem práce bylo pochopení obecného fungování spalovacího motoru jako celku a detailního popsání hlavních funkčních skupin. Tento rozbor dále sloužil k sestavení funkčního modelu spalovacího motoru v programu GT-SUITE.

Aby bylo možné tento model vytvořit, musel jsem nejdřív zvolit motor, pro který jej budu sestavovat. Tím se stal motor závodního týmu Formula TU Ostrava. Na jeho základě jsem tedy mohl začít se získáváním potřebných geometrických a dalších parametrů, které jsou pro tvorbu modelu nezbytné a klíčové z pohledu funkce motoru.

Jako další krok jsem navrhl metodiku, s jakou přistupovat k tvorbě samotného modelu a na co se při ní zaměřit. Použitím postupu této metodiky je možné vytvořit model pro jakýkoliv jiný motor nebo zařízení, pro které by se v budoucnu vytvářel model.

Aplikací navrženého postupu jsem tedy vytvořil funkční model spalovacího motoru, jehož výsledky jsem nadále interpretoval a využil k porovnání s reálnými daty motoru. Během tohoto porovnání jsem provedl kalibraci modelu do takové míry, aby výsledky byly uspokojivé pro jeho aplikaci v praxi a zároveň, aby data upravená při kalibraci odpovídala skutečnosti.

Celkový přínos práce využiji taktéž na soutěžích těchto formulí, kde v disciplínách, kdy se hodnotí porozumění dané problematice, je tato schopnost bodově ohodnocena. Tím může tým získat více bodů a dosáhnout lepšího umístění v závěrečném hodnocení.

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Pavlu Dreslerovi za konzultace při psaní práce ohledně odborných záležitostí týkajících se spalovacích motorů a tvorby jejich výpočetních modelů. Dále bych rád poděkoval VŠB TU – Ostrava, Fakultě strojní a Institutu dopravy za poskytnutí zázemí a všech potřebných prostředků k realizaci mé práce. V neposlední řadě také všem dalším, se kterými jsem dané téma projednával a byli mi cennou oporou.

## Použitá literatura

- [1] MACEK, Jan. Spalovací motory. 2. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze. ISBN 978-80-01-05015-6.
- [2] JOHN B. HEYWOOD, Jan. Internal combustion engine fundamentals. International ed. New York: McGraw-Hill, 1988 [cit. 2018-04-20].. ISBN 00-702-8637-X.
- [3] EDITED BY RICHARD VAN BASSHUYSEN AND SCHAFER, Jan. Internal combustion engine handbook basics, components, systems, and pespectives. International ed. Warrendale, Pa. (400 Commonwealth Dr., Wallendale PA USA): Society of Automotive Engineers, 2004 [cit. 2018-04-20].. ISBN 978-076-8071-962.
- [4] GAMMA TECHNOLOGIES. *Flow Theory Manual*. 601 Oakmont Lane, Suite 220 Westmont, IL 60559 USA, 2017 [cit. 2018-04-20]..
- [5] SOCIETY OF AUTOMOTIVE EENGINEERS. *Formula SAE® Rules*. 1200 G Street, NW, Suite 800 Washington, USA, 2016 [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <https://www.fsaeonline.com/content/2017-18%20FSAE%20Rules%209.2.16a.pdf>
- [6] ŠELONG, Václav. *Návrh zařízení pro analýzu proudění hlavou spalovacího motoru*. Ostrava, 2016 [cit. 2018-04-20]. Bakalářská práce. VŠB-TU Ostrava. Vedoucí práce Ing. Pavel Dresler.
- [7] DRESLER, Pavel. *Matematické modelování*. Ostrava, 2016 [cit. 2018-04-20]. Přednáška, Vozidlové motory. VŠB-TU Ostrava.
- [8] JEVICKÝ, Jiří. Yamaha FZ6 S2. *Motorkari.cz* [online]. 2007 [cit. 2018-05-1]. Dostupné z: [http://www.motorkari.cz/upload/images/cache/clanky/2007-06/4149/20100330131027-19721\\_jpg\\_resize\\_450x1000\\_\\_type\\_jpg\\_jpg](http://www.motorkari.cz/upload/images/cache/clanky/2007-06/4149/20100330131027-19721_jpg_resize_450x1000__type_jpg_jpg)

# Seznam příloh

**Příloha A** Tabulka s nastavením geometrie částí motoru

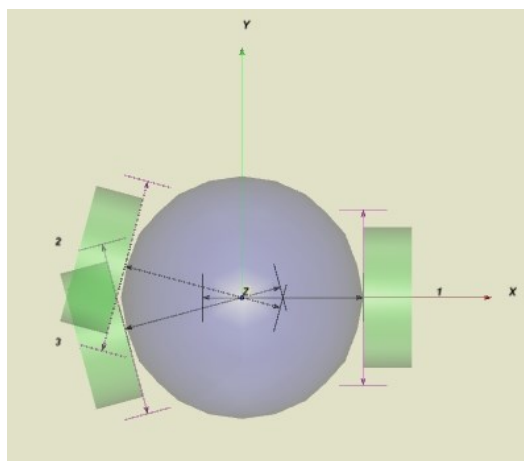
Konstrukční celek	Část	Geometrie	Rozměr	Materiál
Sací systém	Škrťící klapka	Průměr klapky [mm]	29	-
	Restriktor 1	Vstupní průměr [mm]	29	hliník
		Výstupní průměr [mm]	29	
	Restriktor 2	Vstupní průměr [mm]	29	
		Výstupní průměr [mm]	20	
	Restriktor 3	Vstupní průměr [mm]	20	
		Výstupní průměr [mm]	26,5	
	Plenum	Objem [mm <sup>3</sup> ]	2829000	plast
	Runner 1	Délka [mm]	95	
		Průměr [mm]	38,5	
	Runner2	Délka [mm]	20	
		Průměr [mm]	38,5	
	Sací kanál	Objem [mm <sup>3</sup> ]	79342	litina
Motor	Sací ventil	Průměr ventilu [mm]	25	-
		Ventilová vůle [mm]	0,15	
	Válec	Vrtání [mm]	65,5	
		Zdvih [mm]	44,5	
		Délka ojnice [mm]	80	
		Kompresní poměr [-]	12,2	
	Kliková hřídel	Úhel natočení pro započetí časování sacího ventilu [°]	464	
		Úhel natočení pro započetí časování výfukového ventilu [°]	269	
		Úhel natočení klikového hřídele před dosažením HÚ zapalování [°]	-108	
	Výfukový ventil	Průměr ventilu [mm]	22	
		Ventilová vůle [mm]	0,25	
Výfukový systém	Výfukový kanál	Objem [mm <sup>3</sup> ]	31033	litina
	Koleno1	Délka [mm]	33	ocel
		Průměr [mm]	484	
	Spojka1	Objem [mm <sup>3</sup> ]	183000	
	Potrubí	Délka [mm]	125	
		Průměr [mm]	40	
	Spojka2	Objem [mm <sup>3</sup> ]	304500	
	Koleno2	Délka [mm]	546	
		Průměr [mm]	50	

## Příloha B Pořadí zapalování SM

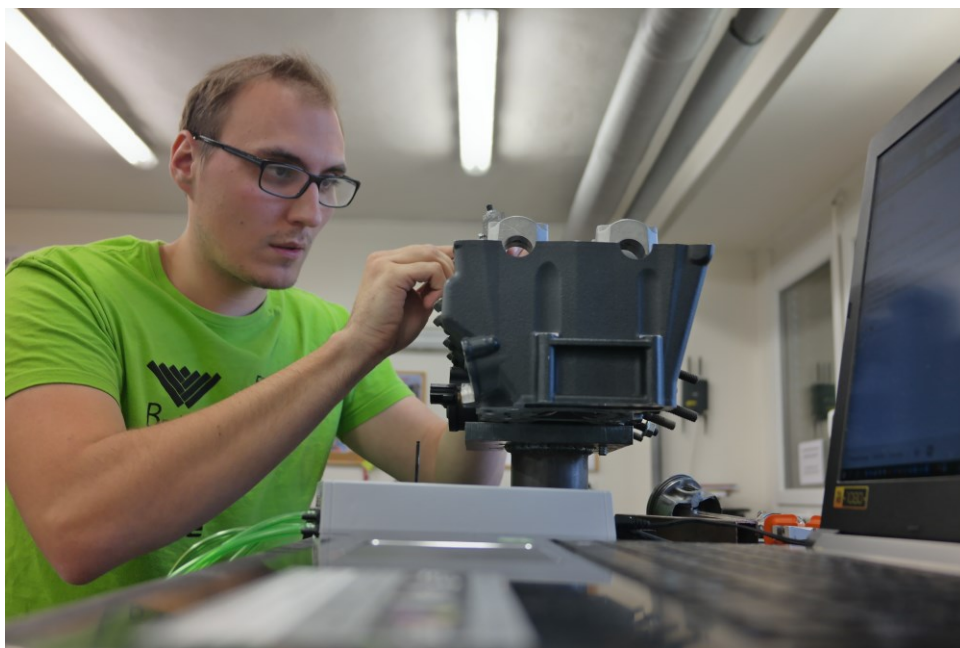
Main		Cylinder Geometry		Firing Order		RLT Norms		Inertia		Bearing Loads		Plots
Attribute	Unit	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Cylinder Number		1...	3...	4...	2...							
Firing Intervals	deg	0.0...	180.0...	180.0...	180.0...							
2-Stroke		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>							

## Příloha C Nastavení geometrie napojení v modelu

Main		Thermal		Pressure Drop		Boundary Data		Plots	3D Flow Split
Attribute	Unit	Boundary #1	Boundary #2	Boundary #3	Boundary #4	Boundary #5	Boundary #6		
Link Name or Number		1...	2...	3...	4...	5...	6...		
Angle (Planar Configuration)									
Angle wrt X-axis (3D)		0.0...	165.0...	-165.0...					
Angle wrt Y-axis (3D)		-90.0...	75.0...	105.0...					
Angle wrt Z-axis (3D)		90.0...	90.0...	90.0...					
Characteristic Length	mm	55.0...	55.0...	55.0...					
Expansion Diameter	mm	60.0...	60.0...	60.0...					



## Příloha D Průběh měření průtokových koeficientů



## Příloha E Grafické znázornění vývoje hodnoty FMEP

